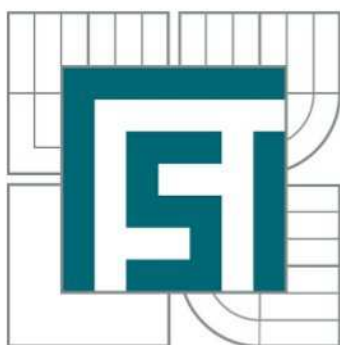




VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ  
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ  
LETECKÝ ÚSTAV

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING  
INSTITUTE OF AEROSPACE ENGINEERING

# PADÁKOVÉ ZÁCHRANNÉ SYSTÉMY LEHKÝCH SPORTOVNÍCH LETADEL

PARACHUTE EMERGENCY SYSTEMS FOR VERY LIGHT SPORT PLANES

DOKTORSKÁ PRÁCE

DOCTORAL THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Ing. OLDŘICH ŠORF

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. KAREL TŘETINA, CSc.

BRNO 2015



## Abstrakt

Tato doktorská práce popisuje padákové záchranné systémy pro malá letadla a zaměřuje se na jejich funkčnost v krajních oblastech obálky použitelnosti, zejména v malých výškách a při malých rychlostech letu (pádu). K rozšíření obálky použitelnosti záchranného systému do této oblasti byl zkonstruován inovativní dělitelný slider kruhového padáku, který za vysokých rychlostí funguje klasickým způsobem, ovšem za nízkých rychlostí se při vytahování padáku z kontejneru vrchlíku rozdělí a neomezuje tak rychlost jeho otevření. Konstrukční řešení tohoto slideru je předmětem nové přihlášky vynálezu „Zařízení pro regulaci rychlosti otevírání padáku“, podané u Úřadu průmyslového vlastnictví v Praze, dne 14.8. 2014 pod číslem PV 2014-543.

Doktorská práce dále obsahuje výpočetní principy otevírání kruhového padáku a konstrukční řešení dělitelného slideru. Pro ověření funkce dělitelného slideru byl vyroben model padáku a podroben sadě shozových zkoušek.

Hlavním přínosem doktorské práce je rozšíření obálky použitelnosti záchranné soustavy do oblasti jejího statisticky nejčastějšího použití, tzn. do malých výšek a malých rychlostí letu (pádu).

## Abstract

This PhD thesis describes parachute rescue systems for small planes and focuses on their functionality in the border areas of the flight envelope, especially at very low altitudes and low airspeeds of flight (fall). For extending the functionality of the rescue system in extreme areas of usability envelope, was founded an innovative dividable parachute slider, which works normally at high speed, but at the low airspeeds does not limit the opening time of the canopy. Structural design of this slider is the subject of a new patent application "Parachute opening speed regulation device", filed with Industrial property Office in Prague on August 14, 2014 under number 2014-543 PV.

The PhD thesis further contains computational principle of circular parachute opening and the structural design. For verification of the dividable slider functionality, a parachute model has been constructed and subjected to a series of drop tests.

The main benefit of the PhD thesis is extending the usability of rescue system into its statistically most frequent use, i.e. into low altitudes and low airspeeds of flight (fall).

## Klíčová slova

padákové záchranné systémy pro letadla, otevírání padáku, řízení otevírání pomocí slideru, dělitelný slider

## Key Words

parachute recovery for aircraft, parachute opening, slider reefing method, dividable slider

## Bibliografická citace

ŠORF, O. *Padákové záchranné systémy lehkých sportovních letadel*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2015. 166 s. Vedoucí dizertační práce doc. Ing. Karel Třetina, CSc..

## **Prohlášení autora o původnosti práce**

Prohlašuji, že jsem dizertační práci na téma Padákové záchranné systémy lehkých sportovních letadel vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a zdrojů.

V Brně dne 16. 4. 2015

.....  
Ing. Oldřich Šorf

## Poděkování

Na tomto místě bych rád poděkoval doc. Ing. Karlu Třetinovi, CSc. a Ing. Robertu Popelovi, Ph.D. za pomoc poskytnutou při studiu a za odborné konzultace k tématu dizertační práce. Dále můj dík patří výsadkové službě 102. průzkumného praporu v Prostějově za poskytnutí prostoru sušící věže, k provedení shozových zkoušek.

## Obsah

<b>1</b>	<b>Úvod .....</b>	<b>10</b>
<b>2</b>	<b>Vymezení obsahu a cíle dizertační práce.....</b>	<b>11</b>
<b>3</b>	<b>Historie padákových záchranných soustav pro letadla .....</b>	<b>12</b>
3.1	Historie výpočtových principů kruhových padáků .....	13
<b>4</b>	<b>Statistika použití záchranných padáků pro letadla .....</b>	<b>15</b>
4.1	Statistika krizových situací pro aktivaci záchranné soustavy.....	15
4.2	Statistika výšek aktivací záchranných soustav .....	16
4.3	Trend situací pro aktivaci ve sledovaném období.....	17
<b>5</b>	<b>Konstrukce padákových záchranných soustav .....</b>	<b>19</b>
5.1	Otevírací proces záchranné soustavy .....	22
5.2	Situace vhodné pro použití záchranné padákové soustavy.....	23
5.3	Umístění záchranné soustavy v letadle.....	24
5.4	Směry výstřelů výtažné rakety .....	24
<b>6</b>	<b>Padákové záchranné soustavy pro letadla z hlediska předpisů.....</b>	<b>26</b>
6.1	Certifikovaná letadla.....	26
6.1.1	Podle FAA .....	26
6.1.2	Podle EASA.....	27
6.2	Necertifikovaná letadla .....	27
6.3	Klasifikace padákových záchranných soustav z hlediska přepravy.....	28
6.4	Zkoušky PZS podle LAA ČR, předpisu ZS2 .....	28
<b>7</b>	<b>Základní princip návrhu kruhového padáku.....</b>	<b>30</b>
7.1	Výběr druhu a tvaru vrchlíku .....	30
7.2	Aerodynamické parametry vrchlíku .....	32
7.3	Materiál vrchlíku .....	34
7.4	Efekt podvěšeného tělesa (forebody effect) .....	34
7.5	Stabilita vrchlíku .....	34
<b>8</b>	<b>Řízení otevírání kruhových padáků.....</b>	<b>35</b>
8.1	Přehled metod řízení otevírání kruhového vrchlíku .....	36
8.1.1	Řízení otevírání pomocí slideru .....	36
8.1.2	Řízení otevírání pomocí obvodové šňůry .....	37
8.1.3	Řízení otevírání pomocí středové šňůry.....	39
8.1.4	Řízení otevírání pomocí třecí brzdy.....	40
<b>9</b>	<b>Návrh padáku pro záchrannou soustavu.....</b>	<b>41</b>
9.1	Vrchlík padáku pro řízení otevírání pomocí středové šňůry.....	41
9.1.1	Princip metody.....	41
9.1.2	Návrh vrchlíku .....	42

9.2	Vrchlák padáku pro řízení otevírání pomocí dělitelného slideru.....	45
9.2.1	Konstrukce dělitelného padákového slideru.....	45
9.3	Mechanismus otevírání padáku vybaveného dělitelným sliderem .....	50
9.3.1	Otevření padáku, při kterém se slider rozdělí.....	51
9.3.2	Otevření padáku se sliderem .....	52
<b>10</b>	<b>Výpočetní návrh kruhového vrchlíku pro padákovou záchrannou soustavu</b>	<b>58</b>
10.1	Vstupní parametry pro výpočet vrchlíku bez slideru .....	58
10.2	Fáze vytahování padáku raketou.....	60
10.3	Fáze plnění vrchlíku padáku vzduchem.....	61
10.3.1	Výpočet plněního času .....	64
10.3.2	Výpočet maximální otevírací síly.....	73
10.3.3	Výpočet pro obecnou trajektorii.....	75
10.4	Fáze stabilizace.....	78
10.5	Fáze ustáleného klesání.....	78
10.6	Výpočet vrchlíku padáku se sliderem .....	78
10.7	Pohybová rovnice padákového slideru .....	82
<b>11</b>	<b>Vlekací zkoušky modelu .....</b>	<b>84</b>
11.1	Měřicí zařízení .....	84
11.2	Vlastní měření .....	84
11.3	Vyhodnocení měření.....	85
11.4	Závěr měření .....	85
<b>12</b>	<b>Shozové zkoušky modelu .....</b>	<b>86</b>
12.1	Vypouštěcí zařízení .....	86
12.2	Měřicí zařízení .....	89
12.3	Identifikace měření .....	91
12.4	Shozové zkoušky pro ověření plnění vrchlíku s dělitelným sliderem .....	91
12.4.1	Vlastní měření.....	92
12.4.2	Vyhodnocení měření .....	94
12.4.3	Závěr měření.....	101
12.5	Shozové zkoušky pro ověření funkčnosti dělení slideru .....	102
12.5.1	Vlastní měření.....	102
12.5.2	Vyhodnocení měření .....	103
12.5.3	Závěr měření.....	110
12.6	Porovnání s výpočtem .....	110
<b>13</b>	<b>Závěr .....</b>	<b>112</b>
	<b>Seznam použitých zdrojů .....</b>	<b>114</b>
	<b>Seznam použitých zkratk .....</b>	<b>117</b>
	<b>Seznam použitého označení .....</b>	<b>118</b>



---

<b>Seznam příloh .....</b>	<b>120</b>
Příloha č.1 Schémata modelů vrchlíků .....	121
Příloha č.2 Tabulky geometrických parametrů padáků [30] .....	123
Příloha č.3 Konstrukce modelu padáku pro zkoušky dělitelného slideru .....	125
Příloha č.4 Balení padáku pro shozové zkoušky .....	129
Příloha č.5 Seznam nejznámějších výrobců PZS .....	133
Příloha č.6 Odvození času otevření pro $\eta=0$ , $n_p=0,5$ .....	135
Příloha č.7 Odvození času otevření pro $\eta \neq 0$ , $n_p=0,5$ .....	138
Příloha č.8 Odvození času otevření pro $\eta \neq 0$ , $n_p \neq 0,5$ .....	141
Příloha č.9 Odvození součinitele dynamického rázu pro $\eta \neq 0$ , $n_p=0,5$ .....	140
Příloha č.10 Výpočet modelů padáku, software Mathcad .....	143

# 1 Úvod

Padákové záchranné soustavy pro celá letadla již dávno nejsou pouze doménou amatérsky stavěných ultralehkých letadel, nýbrž velice rychle se začínají prosazovat coby volitelný prvek aktivní bezpečnosti v komerčním letectví u certifikovaných letadel. Jedná se zejména o kategorie letadel VLA, LSA, ale též kategorie experimental až do maximální vzletové hmotnosti 2300 kg. Použití padákové záchranné soustavy je plně v režii a na zodpovědnosti pilota nebo eventuálně posádky letadla. Výrobci zatím nenesou odpovědnost za jejich použití. Do dnešní doby záchranné soustavy podle zveřejněných informací, zachránily již více jak 400 lidských životů.

Záchranné soustavy se rychle vyvíjejí a výrobci stále přicházejí s dílčími vylepšeními. Základ však zůstává stejný od samotného počátku, cca od r. 1983, a tím je kruhový vrchlík padáku. Se vzrůstajícími výkony ultralehkých letadel, zejména letové rychlosti, vyvstala potřeba přizpůsobit těmto výkonům i padáky pro záchranné soustavy. Proto se po vzoru klouzavých padáků začal i u padáků kruhových používat ke snížení rychlosti otevření padákový slider. Díky vhodně naladěnému slideru mohou být záchranné soustavy aktivovány i při letových rychlostech přes  $300 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ . U takto naladěného padáku se však díky slideru prodlouží i doba otevření při nízké letové rychlosti, což není žádoucí, protože ze statistiky vyplývá, že většina aktivací záchranných soustav se odehraje právě při pomalých rychlostech letu a v nízkých výškách po startu letadla nebo na okruhu.

Otázka zlepšení použitelnosti padákových záchranných soustav je tedy v dnešní době velice aktuální zejména z pohledu možnosti záchrany více lidských životů.

## 2 Vymezení obsahu a cíle dizertační práce

Úvod práce je věnován historii vývoje padákových záchranných soustav pro letadla a též historii výpočtových principů kruhových padáků. Další kapitola obsahuje statistiku aktivací padákových záchranných soustav, která ukazuje na aktuálnost témat dizertační práce. Následující část udává přehled o aktuálních padákových záchranných soustavách zejména z hlediska jejich konstrukce, otevíracího procesu, umístění v letadle a směrů výstřelů výtažné rakety. Vypsány jsou krizové situace vhodné k použití záchranné soustavy. Další kapitola popisuje zakomponování zástaveb záchranných soustav do certifikovaných letadel v leteckých předpisech FAA a EASA a poté požadavky kladené českými předpisy pro necertifikovaná letadla včetně základních požadavků na zkoušky výkonů. Práce dále popisuje základní princip návrhu kruhového padáku a výčet metod řízení otevírání kruhových padáků, včetně jejich popisu a výhod či nevýhod pro použití.

Následují vlastní návrhy nových padáků pro záchrannou soustavu. Nejprve s řízením otevírání pomocí středové šňůry a poté s řízením otevírání pomocí dělitelného slideru. Nápad dělitelného slideru a jeho konstrukce je inovativním prvkem jak u padákových záchranných soustav, tak v oblasti padáků vůbec, proto byl vytvořen počítačový 3D model pro potřeby vizualizace konstrukčních částí a popisu funkce dělení. V následující kapitole jsou rozebrány jednotlivé fáze otevírání padákové záchranné soustavy pro potřeby výpočtu a popis metod vlastního výpočtu. Jsou též navrženy pohybové rovnice padákového slideru.

V dalších kapitolách je popsána experimentální část dizertační práce, jednak orientační vlekačí zkoušky modelu pro ověření konstrukce vrchlíku s řízením otevírání pomocí středové šňůry, pak zejména shozové zkoušky modelu vrchlíku s dělitelným sliderem.

### Jednotlivé cíle dizertační práce:

- zpracování výpočetního návrhu kruhového vrchlíku pro padákové záchranné soustavy lehkých sportovních letadel,
- prověření možností řízení otevírání padáků použitelných u padákových záchranných soustav pro letadla,
- návrh vrchlíku padáku a metody řízení jeho plnění pro použití na vyšším rozsahu rychlostí,
- ověření vlastností na modelech při pozemních a shozových zkouškách.

### **3 Historie padákových záchranných soustav pro letadla**

Myšlenka padáku, na kterém by mohlo přistát celé letadlo, je poměrně stará. Již v roce 1930 v Detroitu prakticky předváděl pilot Vance Breese na upraveném letadle Fairchild KR-31, že v případě nutnosti je možné takový padák otevřít a bezpečně na něm přistát i s celým letadlem. Tento vynález však sloužil zejména k pobavení diváků na leteckých dnech a praktického rozšíření se mu na delší dobu nedostalo.

Během druhé světové války bylo již standardem používání osobních záchranných padáků v letadlech všeho druhu, ale potřeba vývoje záchranného padáku pro celé letadlo nebyla ještě aktuální, i když technická vyspělost by to již umožňovala. Ona potřeba nastala až mnohem později, v době, kdy se létání začalo stávat masovější záležitostí díky ultralehkým letadlům.

V roce 1980 prezentoval Američan Jim Handbury video, na kterém si za letu u svého letadla Quicksilver MX přestřihával vzpěry křídla a po deformaci křídla a nekontrolovatelném pádu ručně otevíral padák, na kterém i s letadlem přistával. Za nějaký čas následoval jeho další pokus opět s letadlem Quicksilver MX, kdy ve výšce 75 stop nad vodou, aktivoval padák vytahovaný raketou. Úspěšně na něm přistál a založil společnost Handbury Parachutes. Tragicky zemřel v roce 1984 po neúspěšné zkoušce záchranného padáku na letounu Cessna 150. Společnost byla po jeho smrti přejmenována na Free Flight Enterprises a výrobou nejrůznějších padáků se zabývá dodnes.

Současníkem Jima Handburyho byl Američan Boris Popov. Po přežitém pádu do jezera na zkolabovaném křídle závěsného kluzáku se rozhodl pro vývoj záchranných padáků a přibližně ve stejné době jako Jim Handbury začal experimentovat s otevíráním pomocí rakety. V roce 1980 založil společnost Ballistic Recovery Systems, Inc., která v roce 1982 přinesla na trh první záchrannou soustavu pro ultralehká letadla. Prvním zachráněným byl 7.8.1983 Jay Tipton. Až do roku 1993 byly záchranné padáky instalovány pouze do ultralehkých a experimentálních letadel, v roce 1993 dostala společnost povolení od FAA k zástavbě záchranné soustavy do letadel Cessna 150 a 152. Zlomovým bodem v masovějším rozšíření záchranných padáků byl rok 1994, kdy společnost zahájila spolupráci s výrobcem letadel Cirrus a záchranné padáky se začaly standardně dodávat do modelů Cirrus SR20 a SR22. V roce 2002 byla hotova certifikace pro Cessna 172 a v roce 2004 pro Cessna 182 Skylane. V této době již létalo 1500 letounů Cirrus se standardně instalovaným záchranným padákem. V roce 2007 měla společnost na kontě už více než 25 tisíc prodaných záchranných padáků, z toho více jak 3 tisíce do certifikovaných letounů.

V tehdejší Československu byl vývoj záchranných padáků podobný jako ve

světě a souvisel též se závěsným létáním a počátečním používáním upravených vojenských padáků. Rok 1984 je počátkem vzniku a výroby záchranných padáků GRS – Galaxy Ballistic Systems. Společnost Galaxy High Technology, s.r.o. je světově druhým největším výrobcem záchranných padáků pro letadla.

### **3.1 Historie výpočtových principů kruhových padáků**

Jelikož je padák jednoduché zařízení, byla historicky potřeba bližšího porozumění jeho fungování odsunuta na pozdější dobu a v počátcích používání kruhových vrchlíků se vystačilo pouze se základními fyzikálními vzorci.

S masivnějším rozvojem padákové techniky v průběhu První světové války se začala projevovat potřeba lepšího poznání dané problematiky. Jako první se touto začal zabývat G.I. Taylor, zejména co se týče základních návrhových kritérií pro stabilitu (r. 1919). Během Druhé světové války pokračoval ve zkoumání detailnější geometrie vrchlíků ve vztahu k použitému materiálu.

První z teorií kulatých padáků se týkala zadržování hmoty uvnitř prostoru obemknutého vrchlíkem padáku Müller 1927[1]. Tento přístup vede přímo ke koncepci plnění času pro danou rychlost a geometrii vrchlíku. Na základech tohoto principu byly publikovány další teorie O'Hara 1949[2], French 1963[3], Heinrich & Noreen 1970[4], Payne 1973[5]. Všechny tyto teorie však nejsou založeny na proudění vzduchu kolem vrchlíků, počítají pouze s časem nutným k naplnění vrchlíku, s různými veličinami vycházejícími z konstrukce vrchlíku a vstupními a výstupními podmínkami.

Fyzikální podstata těchto teorií vychází z druhého Newtonova zákona. Součinitel odporu vrchlíku není v reálném případě konstantní, mění se v závislosti na geometrii vrchlíku. Tyto změny jsou markantní zejména při procesu plnění vrchlíku vzduchem během otevírání, ale též i později při „ustáleném“ klesání vlivem pulsování a oscilace vrchlíku. Součinitel odporu vrchlíku se považuje za konstantní (pro danou konfiguraci je zjištěn experimentálně). A jeho změny se suplují proměnlivou zdánlivou hmotností. Pro výpočet zdánlivé hmotnosti bylo vytvořeno několik teorií (Ibrahim 1967[6], Eaton 1983[7], Yavuz 1989[8]). Tyto modely předpokládají pevnou geometrii vrchlíku, hmotnost vzduchu obklopeného vrchlíkem je konstantní a proměnná zdánlivá hmotnost je spojena pouze se změnou rychlosti. Tyto teorie jsou poměrně dobře použitelné pro známé - experimentem ověřené geometrie vrchlíků.

Prvními pokusy o modelování proudění kolem vrchlíku se zabývali Reddy 1974[9] a Klimas 1979[10] metodou náhrady vrchlíku vírovou plochou a dále pak Roberts 1974[11] použitím startovacího víru a jeho rozvinutí. Tyto modely byly jako první upraveny pro zpracování numerickými metodami na počítačích. Dnešní počítačová technika dovoluje jak řešení proudu – 3D Navier-Stokesových rovnic, většinou

s použitím Smagorinského turbulentního modelu, resp. LES. A dále řešení dynamického chování struktury vrchlíku skládajícího se z „membrán a lan“. Spojením těchto dvou parciálních problémů je pak výsledný model. I když výstupy těchto modelů jsou logické a „vypadají hezky“, bývá obtížné jejich správnost ověřit v reálných podmínkách jak principiálně, tak po kvantitativní stránce.

Měření proudových veličin obtékaného vrchlíku v reálných podmínkách je prakticky nemožné. Uspokojivě lze simulovat obtékání ve větrných nebo vodních tunelech, to však zejména ve stavu ustáleného klesání. Proto je také velice obtížné, kromě shozů ve vysokých halách, sledovat proces otevírání vrchlíku, kdy rychlost soustavy klesá v závislosti na plnění vrchlíku.

De Santis 1970[12] měřil rychlosti proudu použitím Hot-Wire sond rozmístěných po ploše vrchlíku, Klimas 1973[13] měřil rychlostní pole plnění vrchlíku použitím metody héliových bublinek. Měření tlakového rozložení prováděl Lingard 1978[14] ve vodním a větrném tunelu a též ve vodním tunelu Desabrais 2002[15] metodou PIV.

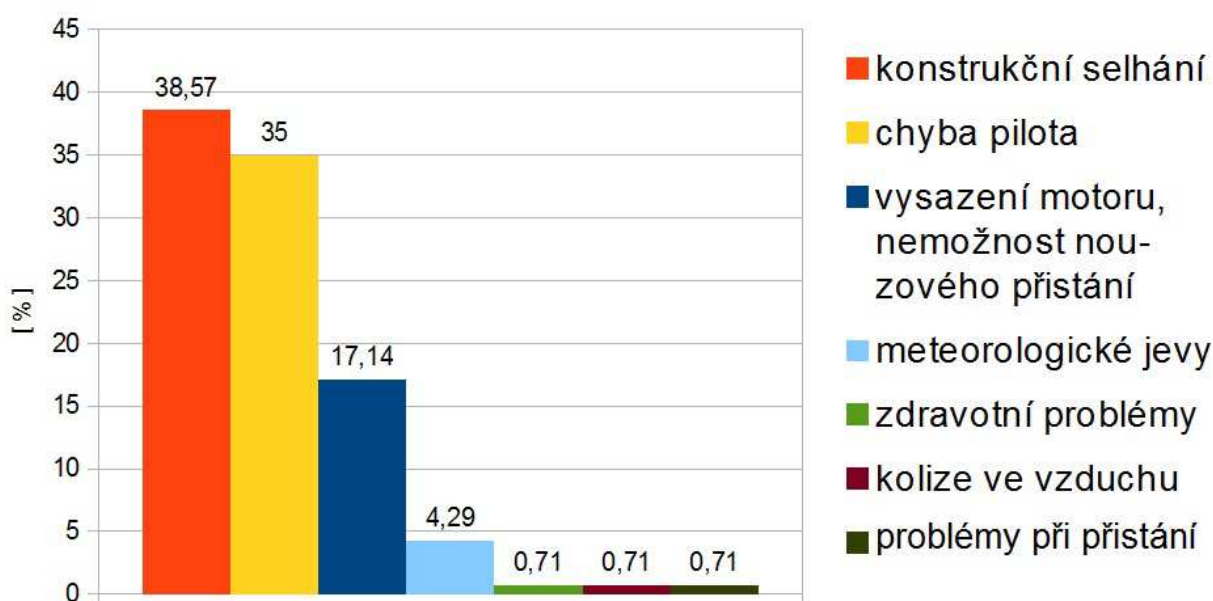
Jones a kol. 2007[16] rozmístil po ploše vrchlíku reflexní body a při shozových zkouškách uvnitř vysoké haly tyto body snímali fotogrammetrickou metodou.

Velkou měrou k současnému poznání chování vrchlíků padáků přispěly častější studie obtékání tupých těles – pevných kruhových vrchlíků a šálků Higuchi 1996[17], Lamberson 1999[18].

## 4 Statistika použití záchranných padáků pro letadla

Pro statistiku byla použita dostupná data největšího světového výrobce padákových záchranných soustav, společnosti Ballistic Recovery Systems, Inc., která má na kontě 324 zachráněných osob (13. 4. 2015). Z celkového souboru dat byly vyřazeny zkušební aktivace a aktivace s neúplnými údaji, čímž byl soubor zredukován na 129 aktivací.

### 4.1 Statistika krizových situací pro aktivaci záchranné soustavy



Obr. 4.1 Statistika krizových situací pro aktivaci záchranné soustavy.

Z uvedeného Obr. 4.1 vyplývá, že majoritními důvody pro použití záchranné padákové soustavy jsou: konstrukční selhání draku letounu 38,6%, nezvládnutí pilotáže, nebo chyba pilota 35% a vysazení motoru nad terénem, nebo za podmínek, které neumožňují nouzové přistání 17,1%.

Ve 4,3% případů byly důvodem aktivace náhlé meteorologické jevy, které znemožňovaly bezpečné pokračování v letu. Po jednom případě pak důvodem byla zdravotní indispozice pilota, kolize ve vzduchu s jiným letounem a nezvládnutí přistání.

## 4.2 Statistika výšek aktivací záchranných soustav



Obr. 4.2 Jednotlivé výšky aktivací záchranných soustav ve sledovaném souboru.

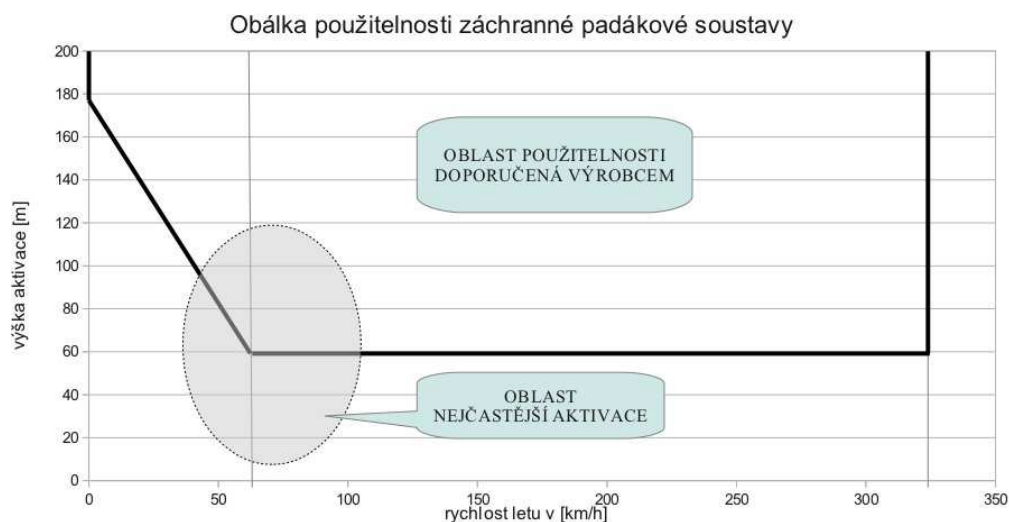


Obr. 4.3 Jednotlivé výšky aktivací záchranných soustav ve sledovaném souboru.



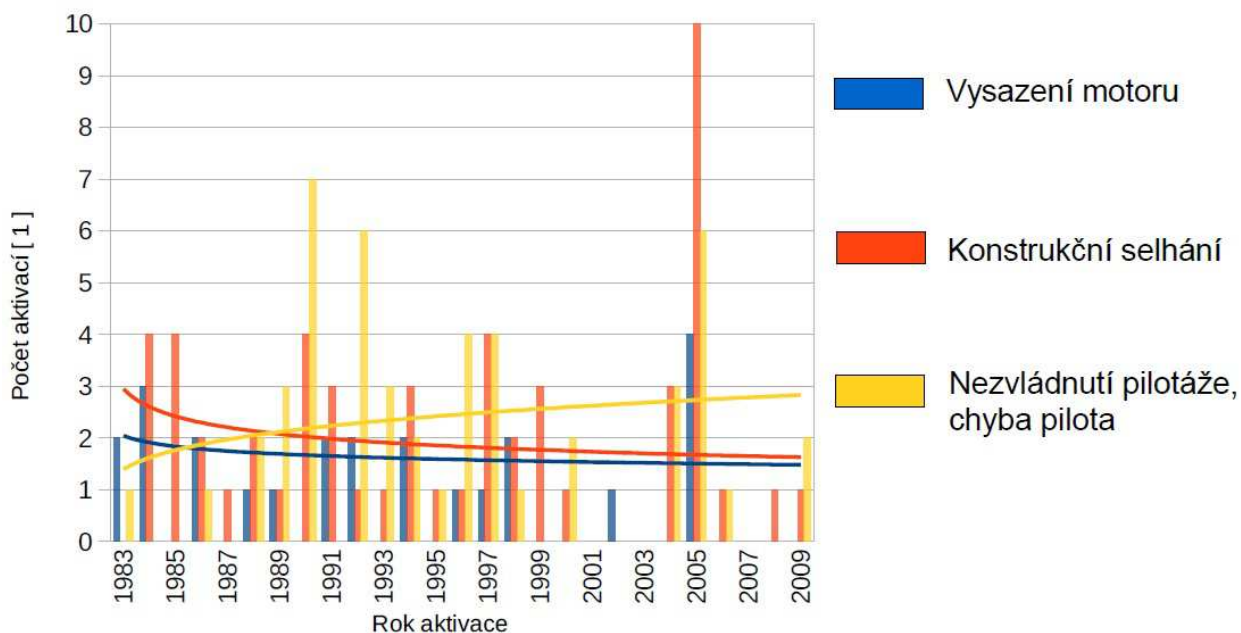
Ze sledovaných 129 aktivací záchranné soustavy bylo 57 % provedeno ve výšce pod 100 m nad terénem.

Plných 34 % dokonce ve výšce pod 50 m nad terénem. Což je pod všemi výrobci doporučenou minimální výškou použití, která začíná cca od 60 m nad terénem, ovšem za „ideálních“ podmínek - při vodorovném letu dopřednou rychlostí  $60 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$  a více.



Obr. 4.4 Obálka použitelnosti záchranné padákové soustavy.

### 4.3 Trend situací pro aktivaci ve sledovaném období



Obr 4.5 Přehled aktivací s trendovými křivkami.

Trendové křivky zobrazené na Obr. 4.5 ukazují vývoj důvodů pro aktivaci záchranné soustavy. Letadlová technika zejména v oblasti ultralehkých letadel udělala od osmdesátých let obrovský krok kupředu jak po konstrukční stránce, tak i v ohledu spolehlivosti, což se projevuje snižujícím se počtem aktivací z důvodu konstrukčního selhání, nebo vysazení motoru. Naopak křivka aktivací z důvodu nezvládnutí pilotáže, nebo chyby, pilota má charakter rostoucí. Stejný předpoklad je i do budoucna.

## 5 Konstrukce padákových záchranných soustav

Pro příklad jsou popsány nejběžnější záchranné soustavy pro ultralehké letouny, tzn. pro maximální zatížení do cca 500kg MTOW.

Složení záchranných soustav lze z hlediska hlavního funkčního poslání jejich částí rozdělit následovně na:

- prostředky vytvářející aerodynamický odpor,
- prostředky sloužící k přenosu sil do konstrukce letounu,
- prostředky uložení a obalu,
- prostředky sloužící k aktivaci záchranné soustavy.

### Prostředky vytvářející aerodynamický odpor

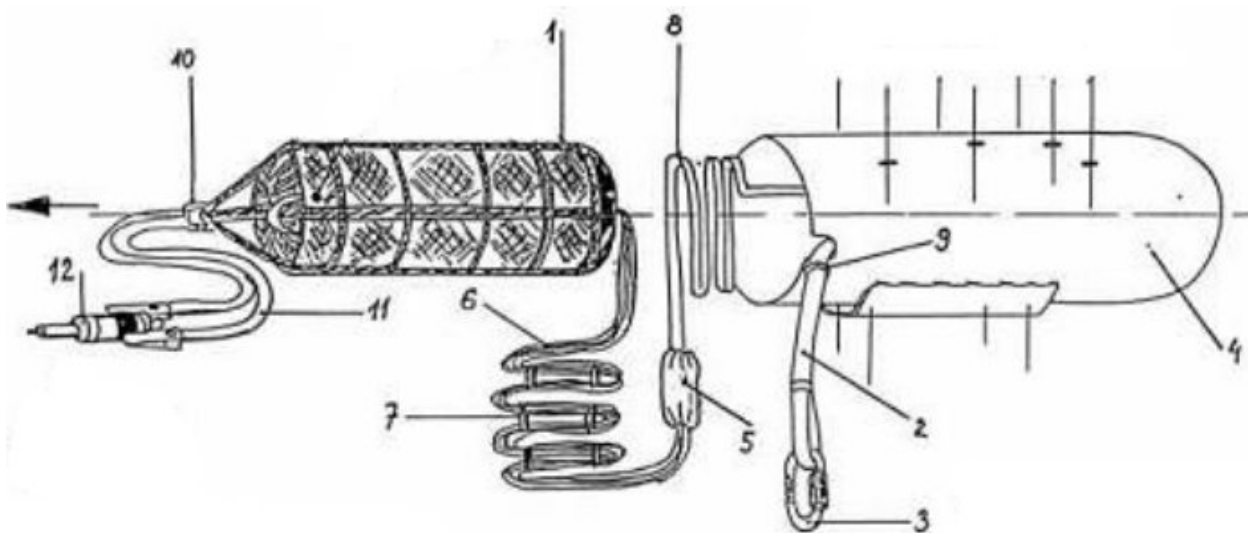
Na vytváření aerodynamického odporu se podílí kromě vrchlíku padáku minoritně i nosné šňůry vrchlíku a kotevní popruh. Není to však z hlediska rozdělení jejich hlavní poslání.

Vrchlíky se používají výhradně kruhové v rozsahu ploch cca od 82 do 105 m<sup>2</sup> a počtem nosných šňůr od 24 do 30. Rychlost klesání v okamžiku přistání se pak pohybuje v rozmezí od 6,2 do 8 m·s<sup>-1</sup>. Profily vrchlíků a použité materiály se různí podle výrobce, stejně jako velikosti pólových otvorů a rozmístění a velikosti případných klapek.

Vrchlíky bez slideru se používají pouze pro motorová rogalá, motorové paraglidery, případně pomalu létající letadla. Pro vyšší letové rychlosti – přibližně od 140 km·h<sup>-1</sup> je nutné použít vrchlík vybavený některou z metod řízení jeho otevírání, která snižuje dynamický ráz od otevírajícího se padáku, působící na posádku a konstrukci letadla. V případě PZS pro letadla se používá výhradně řízení otevírání pomocí slideru.

## Prostředky sloužící k přenosu sil do konstrukce letadla

Nosné šňůry vrchlíku, závěsná oka nosných padákových šňůr, spojovací popruhy vrchlíku, kotevní popruhy a pevnostní připojovací třmeny viz Obr. 5.1.



Obr. 5.1 Složení záchranné soustavy [23].

1. Kontejner vrchlíku
2. Kotevní popruh
3. Pevnostní připojovací třmen
4. Kontejner soustavy
5. Závěsná oka nosných šňůr
6. Nosné šňůry vrchlíku
7. Pružící kroužky
8. Spojovací popruh vrchlíku
9. Těsnění kotevního popruhu
10. Závěs rakety a kontejneru
11. Spojovací popruh rakety
12. Raketa

V případě, že by mohlo dojít ke kontaktu spojovacího popruhu vrchlíku a vrtule (jedná se zejména o letouny s motorem v tlačném uspořádání), musí být spojovací popruh vrchlíku ocelový nebo kevlarový a jeho minimální délka musí být taková, aby alespoň o 1,5 m přesahovala obrys vrtulového disku. U instalace do vrtulníků nebo vírníků by pak měla délka zesíleného nosného popruhu přesahovat o 2 m obrys rotoru a spojovací popruh vrchlíku by měl být vybaven axiálním ložiskem.

### **Prostředky uložení a obalu**

Kontejner soustavy, držák kontejneru, víko kontejneru, krytka raketnice, kontejner vrchlíku.



Obr. 5.2 Varianta záchranné soustavy v pevném kontejneru a kontejneru „softpack“ [24].

Téměř každý výrobce dodává záchranné soustavy ve více modifikacích, a to v pevném kovovém provedení kontejneru soustavy, laminátovém krabicovém provedení, nebo látkovém tzv. softpack. Volba provedení záleží zejména na možnostech instalace soustavy dle typu letadla. Pro vnější instalace, kdy je záchranná soustava vystavena povětrnostním vlivům, se používají výhradně pevné kontejnery. Jedná se o zástavby do motorových rogal, paragliderů, vírníků a všude tam, kde konstrukce letadla nedovolí instalaci do trupu nebo chráněné schránky. Do trupu mohou být instalovány všechny typy soustav, jak pevné, tak s měkkým kontejnerem záchranné soustavy (softpack), záleží na každém individuálním případě, kterou verzi zvolit.

Raketnice je buď pevnou součástí kontejneru soustavy, nebo se umísťuje samostatně.

### **Prostředky sloužící k aktivaci záchranné soustavy**

Aktivační rukojeť, provozní pojistka, ovládací lanko v bowdenu, úderníky, zápalníky, raketnice, raketový motor.

K aktivaci záchranné soustavy slouží rukojeť umístěná v dosahu pilota a nejlépe i ostatních členů posádky. Ideálním místem je střed palubní desky, středová konzola, nebo strop kokpitu. Rukojeť je zajištěná kvůli nechtěné aktivaci na zemi provozní pojistkou, která se snímá před vzletem. Vlastní aktivaci raketového motoru obstarává úderník zapalující dva zápalníky a spouštějící hoření náplně raketového motoru.

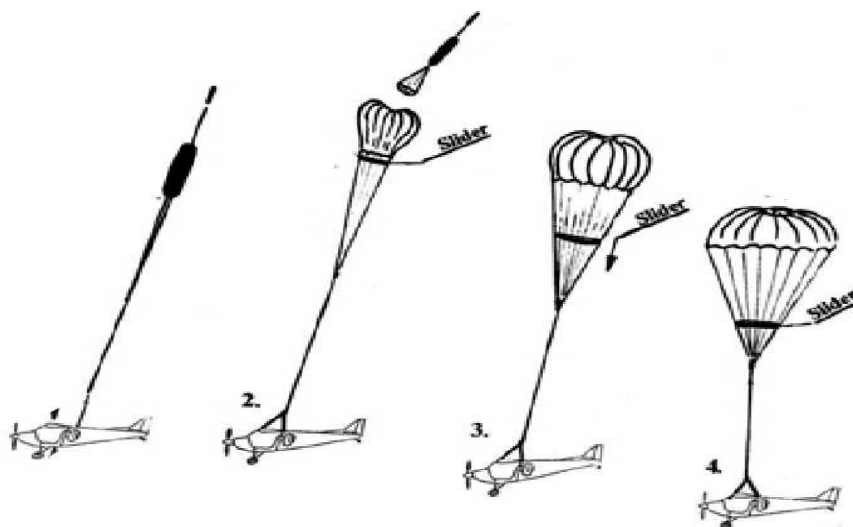
Konstrukce raketnice, rakety i vlastního raketového motoru se liší podle výrobce, používají se dva způsoby provedení. Buď je raketa umístěna v polouzavřené raketnici a při začátku hoření raketového motoru vytváří hořící plyny tlak na dno raketnice a tím přispívají k rychlejší akceleraci rakety. Nevýhodou této konstrukce je zpětný ráz, který vzniká při odpálení, a na který musí být patřičně dimenzováno uchycení raketnice. Druhou možností je průběžná raketnice, kdy jsou hořící plyny odváděny zadní částí raketnice. Při tomto řešení nevzniká zpětný ráz do konstrukce. Volba druhu raketnice však nemá na rychlost otevírání záchranné soustavy téměř žádný vliv.

Raketové motory se používají výhradně na tuhé palivo. Doba hoření raketových motorů se pohybuje od 0,6 do cca 1,3 s. Během této doby musí raketa s rezervou výkonu zajistit plné vytažení všech částí padáku - spojovacího popruhu, nosných šňůr a vrchlíku padáku. Pracovní dráha rakety pak bývá kolem dvaceti metrů.

## **5.1 Otevírací proces záchranné soustavy**

Celý proces začíná rozhodnutím pro aktivaci záchranného padáku (situace pro použití záchranného padáku viz Kapitola 5.2). Vlastní spuštění se realizuje zatažením za aktivační rukojeť v kokpitu. Rukojeť je spojena ocelovým lankem vedeným v bowdenu s pružinou a úderníkem. Rukojeť má zpravidla několik centimetrů volný chod, poté začne síla narůstat v závislosti na stlačování pružiny úderníku. Jakmile dosáhne stlačení pružiny krajní polohy, dojde k jejímu uvolnění a vymrštění úderníku vůči zápalníkům a ty aktivují hoření motoru rakety.

Raketa opouští raketnici a za spojovací popruh (popruhy) rakety odjišťuje víko pevného kontejneru soustavy, nebo rozepíná softpack kontejner a vytahuje kontejner vrchlíku. Po vytažení nosných šňůr vrchlíku a spojovacího popruhu vrchlíku na maximum dochází ke svlečení kontejneru vrchlíku a natažení vlastního vrchlíku padáku. Ten se již současně začíná plnit proudem vzduchu až do jeho kompletního naplnění. Raketa s kontejnerem vrchlíku bývá v místě pólového otvoru vrchlíku spojena trhací šňůrou. Po jejím přetržení pokračuje raketa s kontejnerem vrchlíku dále než dojde k vyhoření paliva. Oddělením kontejneru vrchlíku dojde též k otevření malého stabilizačního padáčku, na kterém se následně vyhořelá raketa s kontejnerem vrchlíku samostatně snese na zem.



Obr. 5.3 Otevírací proces záchranné soustavy [23].

## **5.2 Situace vhodné pro použití záchranné padákové soustavy**

Obecně lze konstatovat, že pokud se pilot během vzletu, letu nebo přistání dostane do krizové situace, o jejímž zvládnutí má sebemenší pochybnosti a která by mohla mít fatální následky, je vždy lepší aktivovat záchrannou padákovou soustavu.

### **Krizové situace**

- **Vysazení motoru:**
  - nad nepřehledným terénem znemožňujícím nouzové přistání,
  - v noci nebo za špatných meteorologických podmínek a snížené viditelnosti znemožňující nouzové přistání.
- **Ztráta kontroly nad letadlem:**
  - vlivem konstrukčního selhání letadla,
  - vlivem nezvládnutí pilotáže nebo chyby pilota,
  - vlivem meteorologických jevů,
  - vlivem zdravotních problémů pilota,
  - vlivem kolize ve vzduchu.
- **Problémy při staru/přistání:**
  - použití PZS ve smyslu brzdícího padáku.

### 5.3 Umístění záchranné soustavy v letadle

Záleží na typu letadla a jeho konstrukci, zda dovoluje zástavbu záchranné soustavy do trupu, nebo musí být umístěna vně letadla. Je zakázáno montovat záchrannou soustavu na silně vibrující části jako jsou motorová lože, konstrukce podvozku atp.

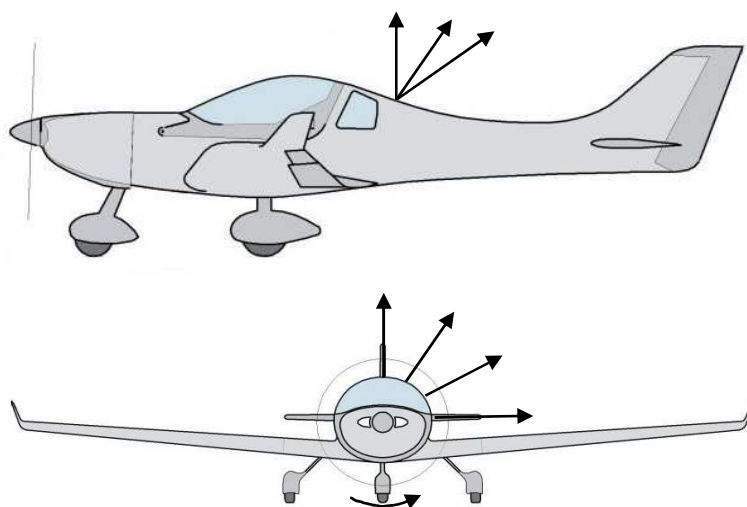
Záchranná soustava váží cca 10 až 15kg, proto je nutné uvážit její umístění i z hlediska vlivu na centráž letadla, nejlépe je s ní počítat již při návrhu.

Kontejner soustavy musí být dostatečně upevněn s ohledem na provozní násobky letadla a pokud je součástí kontejneru soustavy i polouzavřená raketnice, též i s přihlédnutím ke zpětnému rázu při odpálení rakety. V případě vnitřní instalace se musí zabezpečit bezpečný odvod hořících plynů tak, aby neohrozil posádku, palivovou nádrž, palivové vedení, nebo jinou vysoce hořlavou část letadla. Nejlepším řešením v případě průběžné raketnice je odvedení plynů kanálem mimo trup letadla.

Mnoho výrobců dodává záchranné soustavy již s držákem „na míru“ pro daný typ letadla i s podrobným návodem pro zástavbu a instalačním materiálem. V případě nekonvenčních instalací se používají univerzální držáky a většinou bývá doporučeno nechat si schválit instalaci výrobcem. V případě certifikovaných letadel je zástavba dána předpisem.

### 5.4 Směry výstřelů výtažné rakety

Volba směru výstřelu rakety soustavy a tím i směru vytažení padáku je důležitým faktorem v otázce rychlosti naplnění vrchlíku padáku a stabilizace letadla pod naplněným vrchlíkem. Obecně se nedoporučuje vést směry výstřelů do dolní polosféry letadla kvůli zbytečné ztrátě výšky, než dojde k naplnění vrchlíku. Nejběžnější proto bývá u letounů s vrtulí v tažném uspořádání vést směry výstřelů podle Obr. 5.4.



Obr. 5.4 Směry výstřelů výtažné rakety pro letouny s vrtulí v tažném uspořádání.





Obr. 5.5 Příklady instalace do letounu s vrtulí v tažném uspořádání [26].

Pokud se vede výstřel při vysoké letové rychlosti vzhůru kolmo na směr letu, může dojít v počátečním kyvu k situaci, kdy se letadlo dostane nad plnící se vrchlík, čímž se výrazně prodlužuje doba stabilizace letadla na otevřeném padáku. Proto je lepší, s ohledem na ocasní plochy, výstřel směřovat pod úhlem směrem k ocasu, kdy nedochází k tak výraznému kyvu. Podle některých výrobců dochází k nejmenší ztrátě výšky během otevírání padáku při horizontálním letu, pokud se výstřel směřuje do strany v rozmezí horizont  $0^\circ$  až  $45^\circ$ . V případě bočního směřování výstřelu je pak vhodné střílet do té strany, na které se listy vrtule pohybují směrem nahoru.

- **letadla s vrtulí v tlačném uspořádání**

U těchto letadel, motorových rogal a paragliderů se výstřel směřuje proti směru letu, eventuálně kolmo na směr letu (do boku). Vždy ale tak, aby byla šance kontaktu spojovacího lana s vrtulovým diskem minimální.

- **vrtulníky a vírníky**

Výstřel rakety se směřuje pod úhlem do boku.



Obr. 5.6 Instalace záchranné soustavy na vírník [26].

## 6 Padákové záchranné soustavy pro letadla z hlediska předpisů

Požadavky na konstrukci, výkony a zástavbu padákových záchranných soustav se liší podle kategorie letadel, pro kterou jsou určena.

### 6.1 *Certifikovaná letadla*

Povolení pro zástavbu konkrétní záchranné soustavy do certifikovaného letadla vydávají letecké organizace jednotlivých zemí podle národních předpisů. Nejčastěji organizace FAA (Federal Aviation Administration) pro území USA, nebo evropská EASA (European Aviation Safety Agency).

#### 6.1.1 Podle FAA

V případě FAA vychází padákové záchranné soustavy pro letadla z následujících předpisů, kde jsou obsaženy obecné podmínky pro zástavbu a základní požadavky na použitelnost záchranné soustavy:

- 14 CFR
  - Part 23 Airworthiness standards: normal, utility, acrobatic, and commuter category airplanes
  - Part 36 Noise standards: aircraft type and airworthiness certification
  - Part 11 General rulemaking procedures
    - §11.27

Pro definování bližších požadavků na použitelnost a výkony padákové záchranné soustavy FAA využívá oporu v předpise:

Personnel Parachute Assemblies TSO-C23d

Na základě výše uvedených předpisů FAA definuje požadavky na zástavbu konkrétní padákové záchranné soustavy do konkrétního letadla a při splnění vydává tzv. STC certifikát - Supplemental Type Certificate pro dané letadlo.

Certifikovaná letadla s možností zástavby PZS jsou například Cessna 150, 172, 182, 162, letadla výrobce Cirrus SR20, SR22, Piper Aircraft PiperSport LSA, Flight Design CT light-sport aircraft LSA.

## 6.1.2 Podle EASA

V případě EASA jsou padákové záchranné soustavy pro letadla pod předpisem

- Part 21
  - Part-21 / AMC / GM Issue 2 Acceptable Means of Compliance and Guidance Material
    - GM 21.A.16B Special Conditions
      - Service experience has shown that unsafe conditions may exist.

Výraz „pokračovat v bezpečném letu a přistání“ znamená podle AMC 25.1309 způsobilost k pokračování v řízeném letu a přistání, možná s použitím nouzových postupů, ale nevyžadující zvláštní dovednosti nebo síly pilota. S poruchovým stavem může být spojeno určité poškození letadla v průběhu letu nebo přistání.

Poté na základě tohoto předpisu EASA definuje konkrétní požadavky na vlastnosti záchranné soustavy:

ASTM Designation F 2316-06 Standard Specification for Airframe Emergency Parachutes for Light-Sport Aircraft.

## 6.2 Necertifikovaná letadla

Pro tato létající zařízení byly padákové záchranné soustavy primárně vytvořeny a léta vyvíjeny. Jedná se zejména o kategorie VLA, LSA ale též kategorie experimental až do MTOW 2300 kg.

Provoz těchto letadel upravují v jednotlivých zemích příslušné letecké asociace a v některých případech mají zpracovány i požadavky na vlastnosti padákových záchranných soustav a metodiky jejich zkoušek pro uznání způsobilosti formou vydání Typového průkazu.

V České republice zaštiťuje provoz sportovních létajících zařízení (SLZ) až do kategorie ELSA (MTOW 600 kg) Letecká amatérská asociace ČR, která vydala požadavky pro uznání způsobilosti záchranných systémů pro SLZ předpisem ZS2.

Předpis ZS2 upravuje požadavky na konstrukci a stavbu, materiály a provedení, značení a zkoušky způsobilosti.

Čeští výrobci však dávají raději přednost certifikaci podle německé Deutschen Ultraleichtflugverbandes (DULV), jejíž certifikace má ve světě větší jméno a navíc je v některých případech benevolentnější v nárocích na výkony. Například maximální povolená klesací rychlost na otevřeném padáku je podle DULV pro dvoumístné SLZ do  $7,5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , oproti LAA ČR, která povoluje pouze do  $6,8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ .

### **6.3 Klasifikace padákových záchranných soustav z hlediska přepravy**

Padáková záchranná soustava je díky raketě na pevné palivo klasifikována jako nebezpečné zboží třídy 1 - výbušniny (klasifikaci vydal Český lodní a průmyslový registr). S ohledem na tuto klasifikaci musí být se záchrannou soustavou nakládáno z hlediska přepravy - přepravní pojistky, bezpečnostní koš, atd.

Z mezinárodního hlediska pak PZS podléhá UN 453 (Rockets, line-throwing), třída 1.4G (klasifikaci vydal International Maritime Dangerous Goods Code IMDG).

### **6.4 Zkoušky PZS podle LAA ČR, předpisu ZS2**

- **Zkoušky klesavosti**

Musí být provedeny nejméně 3 shozy se zkušební zátěží, jejíž hmotnost je rovna max. provozní hmotnosti. Průměrná rychlost klesání nesmí být vyšší než  $6,8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  pro padákové systémy přepočteno na MSA. Měření klesavosti musí být provedeno v intervalu nejméně 30 m od terénu.

- **Zkoušky stability**

Musí být provedeny 3 zkoušky se zátěží min. provozní hmotnosti. Kývání nesmí překročit  $15^\circ$  od svislice v konfiguraci po otevření padáku. Vrchlík musí prokazovat vlastnosti útlumu kyvů max. výchylky  $15^\circ$  od svislice.

- **Zkouška účinnosti záchranného padákového systému při aktivaci raketovým motorem nebo rovnocenným aktivačním zařízením**

Zkoušky se provádějí s kompletním PZS připraveným pro použití ve SLZ. (Musí odpovídat zástavbě PZS v SLZ). Spojovací prvky (lana) PZS určené k upevnění na SLZ se připevní ke zkušebnímu vozidlu. Kontejner (obal padáku) PZS s aktivačním zařízením musí být upevněn v úhlu  $90^\circ$  k podélné a příčné ose letu (směru jízdy zkušebního vozidla) tak, aby aktivace vytažení vrchlíku zaručila překonání překážky vysoké 2 m ve vzdálenosti 4 m měřeno od roviny uzávěru kontejneru (obal s vrchlíkem). Tato zkouška se prokazuje 1 x při rychlosti  $100 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$  (měří se relativní rychlost).

Další zkoušky se provedou 2 x při rychlosti  $60 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ . Z výsledku času otevření vrchlíku PZS (od spuštění do úplného naplnění vrchlíku) se stanoví minimální bezpečná výška použití pro požadovanou rychlost podle vzorce (značení podle ZS2).

$$H_0 = H_z - \frac{gt_0^2}{4} \quad (6.1)$$

a čas klesání na otevřeném padáku:

$$t_{kl} = \frac{H_0}{VRK}, \quad (6.2)$$

$t_{kl}$  musí být větší, než 2 s.

Kde  $H_0$  je minimální bezpečná výška pro záchranu,  $H_z$  výška v okamžiku spuštění PZS,  $t_0$  čas otevření vrchlíku,  $VRK$  vertikální rychlost klesání.

## 7 Základní princip návrhu kruhového padáku

Je důležité poznamenat, že pojem kruhový vrchlík nemusí nutně znamenat kruhový tvar vrchlíku. Tento pojem je přenesen z historie, kdy vrchlíky jiného tvaru nebyly známy. Od vynálezu klouzavého vrchlíku (cca rok 1975) se pod názvem kruhový vrchlík rozumí téměř každý vrchlík, který pracuje zejména na principu aerodynamického odporu, na rozdíl od principu aerodynamického vztlaku u vrchlíku klouzavého. Níže uvedené principy platí zejména pro potřeby záchranných padáků lehkých sportovních letadel.

### 7.1 Výběr druhu a tvaru vrchlíku

Hlavními geometrickými parametry kruhového vrchlíku jsou : tvar - půdorys a profil, průměr vrchlíku, jeho plocha a délka šňůr. Dalšími pak velikost pólového otvoru a případných dalších otvorů a klapek. Je známo a v laboratorních podmínkách odzkoušeno cca 20 základních typů kruhových vrchlíků, ze kterých je možné vybrat druh a tvar. Hlavními parametry pro výběr vrchlíku jsou:

- **součinitel aerodynamického odporu**, který je mírou rychlosti klesání,
- **součinitel dynamického rázu**, který je mírou velikosti přetížení při otevření vrchlíku,
- **průměrný úhel oscilace**, který je mírou stability vrchlíku během sestupu.

Je velice důležité pečlivě zvážit všechny parametry a dostupné informace a vrchlík vybrat cestou rozumného kompromisu. Honba za co nejvyšším součinitelem aerodynamického odporu má ve většině případů nepříznivé dopady na ostatní vlastnosti, zejména stabilitu.

### Geometrie vrchlíku

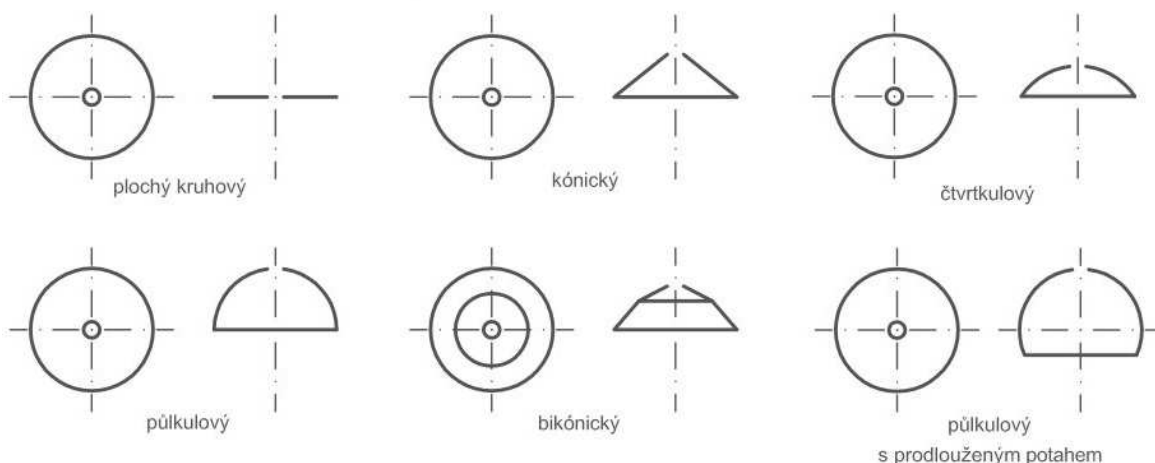
Geometrií vrchlíku se rozumí druh jeho konstrukce, velikost, tvar, velikosti a rozmístění případných ventilačních otvorů a klapek a počet a délka nosných šňůr.

- **Konstrukce** vrchlíku - způsob spojování jednotlivých polí vrchlíku, míra zpevnění vrchlíku lemovkami, počet a způsob napojení nosných šňůr se volí podle požadovaného zatížení a rozsahu rychlostí pro jeho použití.
- **Velikost vrchlíku** se vypočítává na základě konstrukce vrchlíku a požadované rychlosti klesání.
- **Ventilační otvory a klapky**, jejich rozmístění a velikosti se volí s ohledem na požadavky stability během sestupu, dopředné rychlosti vrchlíku a eventuálně jeho případné říditelnosti.

- **Počet a délka nosných šňůr** je důležitým parametrem pro stabilitu a symetrii otevírání, ale též se projevuje na velikosti součinitele aerodynamického odporu.

### Tvar vrchlíku

Je daný jeho půdorysem a profilem.



Obr. 7.1 Základní půdorysy a profily vrchlíků padáků.

### Plocha a průměr vrchlíku

- **pro potřeby výroby**

konstrukční průměr vrchlíku  $D_c$ , konstrukční plocha vrchlíku  $S_c$

- **pro potřeby aerodynamických výpočtů**

nominální průměr vrchlíku  $D_0$ , nominální (celková) plocha vrchlíku  $S_0$

obtékaný průměr vrchlíku  $D_{inf}$ , obtékaná plocha vrchlíku  $S_{inf}$

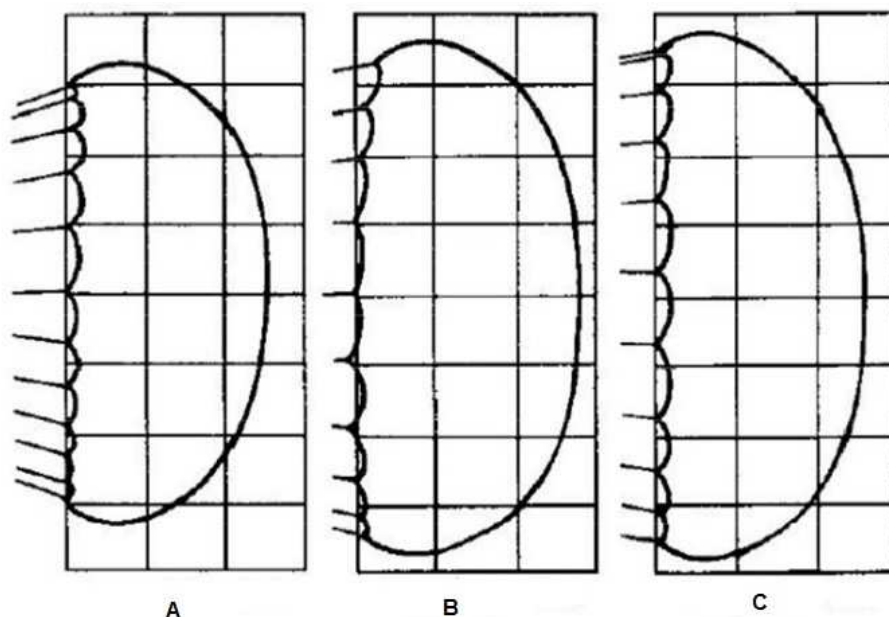
Nominální plocha vrchlíku  $S_0$  je celková plocha vrchlíku včetně pólového otvoru a případných dalších otvorů a klappek. Z této plochy se dopočítává nominální průměr vrchlíku  $D_0$ , což je průměr kruhu o ploše  $S_0$ :

$$D_0 = \sqrt{\frac{4S_0}{\pi}}. \quad (7.1)$$

Obtékaný průměr vrchlíku  $D_{inf}$  a obtékaná plocha vrchlíku  $S_{inf}$  je průmět plochy do roviny kolmé k rychlosti nabíhajícího proudu, změřený při ustáleném klesání vrchlíku. Zjišťuje se měřením z tunelových testů nebo shozových zkoušek.

## Délka nosných šňůr

Velikost obtékaného průměru vrchlíku  $D_{inf}$  je přímo úměrná délce nosných šňůr  $L_{susp}$  viz Obr. 7.2. Obvyklé je volit délku nosných šňůr kolem 1 až 1,5 násobku konstrukčního průměru  $D_c$ . Delší nosné šňůry než dvojnásobek konstrukčního průměru  $D_c$  se nedoporučují kvůli nepřiměřenému nárůstu hmotnosti.



Obr. 7.2 Vliv délky nosných šňůr na velikost obtékané plochy vrchlíku [19], „A“  $L_{susp}=D_c$ , „B“  $L_{susp}=1,5 D_c$ , „C“  $L_{susp}=2 D_c$ .

## 7.2 Aerodynamické parametry vrchlíku

### Součinitel odporu vrchlíku

Součinitel odporu vrchlíku  $C_D$  je vztažen k nominální (celkové) ploše vrchlíku  $S_0$  a udává, jak efektivně daný vrchlík vytváří aerodynamický odpor v závislosti na jeho konstrukčním řešení. Zpravidla se volí podle doporučených hodnot.

### Aerodynamický odpor vrchlíku padáku

V případě stabilního vrchlíku dojde při ustáleném klesání k silové rovnováze mezi ustálenou odporovou silou  $F$  a celkovou hmotností soustavy  $W$ :

$$F = \frac{1}{2} \rho V^2 C_D S_0. \quad (7.2)$$



## Rychlost ustáleného klesání

Pro ustálenou rychlost klesání při hladině moře s použitím (7.2) platí:

$$V = \sqrt{\frac{2mg}{\rho_0 C_D S_0}}. \quad (7.3)$$

## Součinitel dynamického rázu

Součinitel dynamického rázu  $x_i$  je dán dle [30] poměrem mezi okamžitou odporovou silou  $F$  a silou při ustáleném klesání padáku  $F_s$  ovšem za rychlost  $V_s$ , která je rychlostí počátku plnění vrchlíku padáku vzduchem:

$$x_i = \frac{F}{F_s} = \frac{\frac{1}{2} \rho V^2 C_D S}{\frac{1}{2} \rho V_s^2 C_D S_0}. \quad (7.4)$$

Změnu hustoty vzduchu během otevírání padáku lze zpravidla zanedbat, potom:

$$x_i = \frac{C_D S}{C_D S_0} \cdot \left( \frac{V}{V_s} \right)^2. \quad (7.5)$$

## Otevírací síla

Průběh síly působící na podvěšené těleso během otevírání padáku je důležitým parametrem ve smyslu dimenzování vrchlíku, závěsů a únosnosti konstrukce, ke které je padák připojen. Okamžitou otevírací sílu lze vyjádřit jako:

$$F = x_i \cdot F_s. \quad (7.6)$$

V souvislosti s otevírací silou je nutné zmínit dva druhy obtékání vrchlíku při otevírání:

**Obtékání nekonečným proudem** (infinite mass) - otevírání padáku v tomto režimu znamená, že je malý rozdíl mezi rychlostmi na počátku otevírání  $V_s$  a konci otevírání  $V_f$ . Představiteli tohoto režimu otevírání jsou stabilizační a výtažné padáky. Tento režim je typický pro otevírání padáku při zkouškách vrchlíků ve větrném tunelu - rychlost nabíhajícího proudu vzduchu s rostoucí odporovou plochou vrchlíku neklesá, nýbrž je konstantní.

**Obtékání omezeným proudem** (finite mass) - otevírání padáku v tomto režimu znamená, že je vysoký rozdíl mezi rychlostmi na počátku otevírání  $V_s$  a konci otevírání  $V_f$ . Typickými představiteli tohoto režimu otevírání jsou osobní padáky, cargo padáky a padáky záchranných soustav pro letadla,

### 7.3 Materiál vrchlíku

Výběr materiálu vrchlíku je úzce provázán jak s výběrem druhu a tvaru vrchlíku, tak i s jeho konstrukcí. Mezi hlavní materiálové vlastnosti tkanin, používaných pro výrobu kruhových vrchlíků, patří vysoká odolnost vůči zatížení, odolnost proti šíření thlin (ripstop), třecí odolnost, odolnost proti UV záření, antistatické vlastnosti a porozita.

Z konstrukčního hlediska je pak nejdůležitější porozita materiálu, tzn. míra propustnosti vzduchu. Ta se promítá do součinitele aerodynamického odporu vrchlíku, stability vrchlíku a jeho otevíracích vlastností.

Druhy materiálů na jednotlivé části vrchlíku (obchodní názvy).

- **pole vrchlíku** : zejména polyamidové tkaniny - Nylon
- **nosné šňůry** : Dacron, Spectra, Vectran
- **lemovky a popruhy** : Nylon
- **obaly, doplňky** : Kevlar, Nomex, Teflon

### 7.4 Efekt podvěšeného tělesa (forebody efect)

Je míra ovlivnění obtékání vrchlíku padáku tvarem a velikostí tělesa pod ním zavěšeného. Tento efekt se výrazně projevuje právě u padákových záchranných soustav pro letadla. Více viz Kapitola 10.3.

### 7.5 Stabilita vrchlíku

Stabilitou vrchlíku padáku se rozumí jeho tendence vrátit se do rovnovážného stavu po předchozím vychýlení. Rovnovážným stavem může být buď ustálené klesání, nebo ustálené klesání s oscilací. Míra stability se vyjadřuje průměrným úhlem oscilace. Důvodů k porušení rovnovážného stavu ustáleného klesání je mnoho a v reálných podmínkách se jim nelze vyhnout. Jedná se o meteorologické jevy - poryvy větru, termické proudy, dále pak výše zmiňovaný efekt podvěšeného tělesa a též hned v počátku sestupu vlastní otevření padáku. Vrchlíky padákových záchranných soustav pro letadla nemusí být oscilačně staticky stabilní, ale případné zvyšování oscilace musí být silně dynamicky tlumeno, aby zůstávala v přijatelných mezích.

Stabilitu vrchlíku ovlivňuje jeho konstrukce - tvar, velikost a počet ventilačních otvorů a klapek, dále pak použitý materiál polí a délka nosných šňůr. Rychlost stabilizace po otevření vrchlíku je velice důležitá zejména u padákových záchranných soustav pro letadla, které bývají aktivovány v malých výškách.

## 8 Řízení otevírání kruhových padáků

Od otevírání padáku se odvíjí většina parametrů pro návrh vrchlíku. Správné naladění rychlosti plnění vrchlíku vzduchem při velkém rozsahu aktivačních rychlostí je největším problémem záchranných padákových soustav pro letadla.

### Definice problému

Jak vhodně zajistit takové silové působení padákové záchranné soustavy na letadlo, které v problémové situaci zabezpečí **současně**:

- co nejrychlejší otevření vrchlíku padáku,
- nepřekročení maximální hodnoty přetížení dané odolností padáku, nebo konstrukcí letadla.

### Řešení problému

Zajistit, aby velikost odporové plochy plnicího se vrchlíku, byla nepřímo úměrně, automaticky řízena v závislosti na rychlosti soustavy. A to s podmínkou nepřekročení povoleného násobku přetížení.

Ideální vrchlík padáku je takový, který se otevírá se stejným (námi požadovaným) dynamickým rázem jak při nízkých, tak i při vysokých rychlostech aktivace. Limitní velikost dynamického rázu je dána menší z hodnot pevnosti padáku, nebo únosnosti konstrukce, ke které je padák připojen.

### Proces plnění vrchlíku kruhového padáku se sliderem

V počáteční fázi, kdy je vrchlík natažen a začíná do něj vstupním hrdlem proudit vzduch, slider ovlivňuje velikost tohoto otvoru a tím rychlost proudění vzduchu do vrchlíku. Na dalších fázích se slider podílí pouze mírně, a to zajištěním stejně velkého plnicího hrdla. Hlavní funkce slideru nastává v okamžiku, kdy obemknutý vzduch vrchlíkem začne postupovat dolů k vstupnímu hrdlu a snaží se ho rozevřít. V tomto okamžiku působí slider, který je vlastní odporovou silou stále držen v místě napojení nosných šňůr na vrchlík, jako brzda rychlého roztažení hrdla vrchlíku. Dalším plněním vrchlíku a klesáním rychlosti pádu dojde k překonání síly slideru. Začne se zvětšovat vstupní hrdlo, slider se pohybuje po nosných šňůrách směrem dolů a vrchlík se plní. Slider tedy zejména zabraňuje příliš rychlému rozevření vstupního hrdla vrchlíku, které má za následek velký dynamický ráz při otevírání. Zároveň díky pomalejšímu plnění vrchlíku v závěrečné fázi nedochází k jeho tak výraznému přeplnění a tím pulzování (wake re-contact).

## **8.1 Přehled metod řízení otevírání kruhového vrchlíku**

Kruhový vrchlík je jak konstrukčně, tak principiálně velice jednoduché zařízení, jehož rychlost otevření je silně závislá na rychlosti letu (pádu) v okamžiku aktivace a na této rychlosti je závislá velikost dynamického rázu. Podstatou procesu řízení otevírání u kruhového vrchlíku je zajistit vhodnou změnu velikosti odporové plochy vrchlíku tak, aby nebyl překročen maximální povolený násobek přetížení působící na konstrukci letadla. Z důvodu vysokého dynamického rázu do konstrukce musí být vrchlík padáku již od poměrně nízkých rychlostí, cca od  $140 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ , vybaven některým ze způsobů řízení rychlosti otevírání. V oblasti záchranných padáků pro letadla se vrchlíky bez řízeného otevírání používají pouze u motorových paragliderů, rogal a pomalu létajících letadel.

Mezi základní metody řízení otevírání kruhových vrchlíků patří:

- řízení otevírání pomocí slideru,
- řízení otevírání pomocí obvodové šňůry,
- řízení otevírání pomocí středové šňůry,
- řízení otevírání pomocí třecí brzdy.

### **8.1.1 Řízení otevírání pomocí slideru**

Řízení otevírání pomocí slideru je jedna z nejčastějších metod zejména u vrchlíků typu křídlo, ale úspěšně se používá i u vrchlíků kruhových. Slider je zpravidla tvaru mezikruží, které je po svém obvodu vybaveno průchodkami pro nosné šňůry vrchlíku. V okamžiku otevírání je slider umístěn nahoře u vrchlíku v místě napojení nosných šňůr k látce vrchlíku. V úvodní fázi otevírání vrchlíku je slider svým aerodynamickým odporem držen v pozici napojení šňůr a brání tak rychlému roztažení vrchlíku a zároveň omezuje proudění vzduchu do vrchlíku. V okamžiku, kdy roztahující se vrchlík překoná aerodynamický odpor slideru a třecí síly mezi průchodkami a nosnými šňůrami, začne se slider pohybovat směrem dolů k volným koncům vrchlíku.

Metoda řízení otevírání pomocí slideru je výhodná díky své konstrukční jednoduchosti a zejména automatickosti celého procesu. Díky tomu patří k nejbezpečnějším metodám řízení otevírání kruhových vrchlíků.



Obr. 8.1 Vrchlík se sliderem [23].



Obr. 8.2 Vrchlík se sliderem "BAT Sombrero"[35].

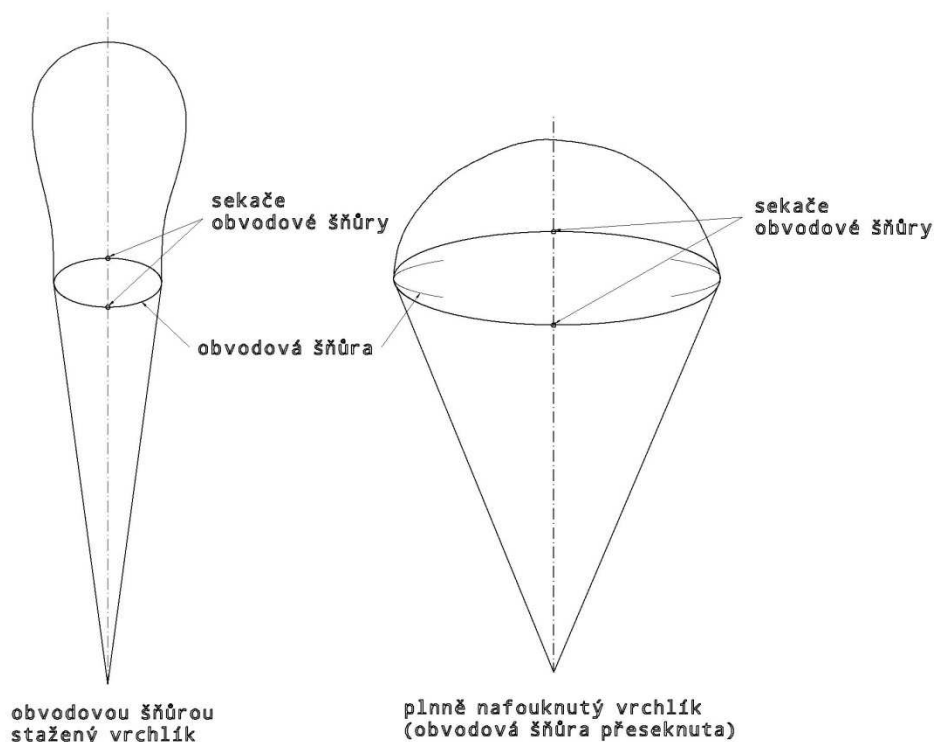
### 8.1.2 Řízení otevírání pomocí obvodové šňůry

Při této metodě jsou po obvodu vrchlíku padáku našity kovové kroužky, kterými je protažena obvodová šňůra. Délka obvodové šňůry určuje průměr vstupního hrdla vrchlíku viz Obr. 8.3. Obvodová šňůra je též protažena časově nastavitelnými, pyrotechnickými sekači. V okamžiku natažení nosných šňůr vrchlíku jsou aktivovány sekače, které po nastaveném čase přeseknou obvodovou šňůru a dovolí tak vrchlíku plné nafouknutí.

Pyrotechnické sekače jsou vždy nejméně dva, kvůli zajištění funkčnosti v případě selhání jednoho z nich. Kovové kroužky mohou být našity buďto v místě napojení nosných šňůr k vrchlíku - varianta A viz Obr. 8.4, nebo ve středu jednotlivých polí vrchlíku - varianta B.

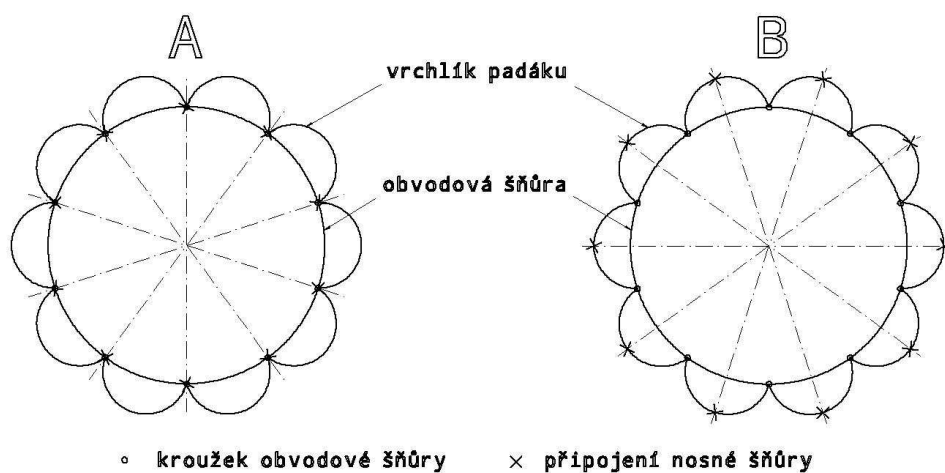
Metoda je výhodná zejména kvůli možnosti aktivně ovlivnit dobu otevírání vrchlíku, a to nastavením času na pyrotechnických sekačích.

Tato metoda řízení otevírání byla používána u padáků návratových modulů kosmického programu Apollo.

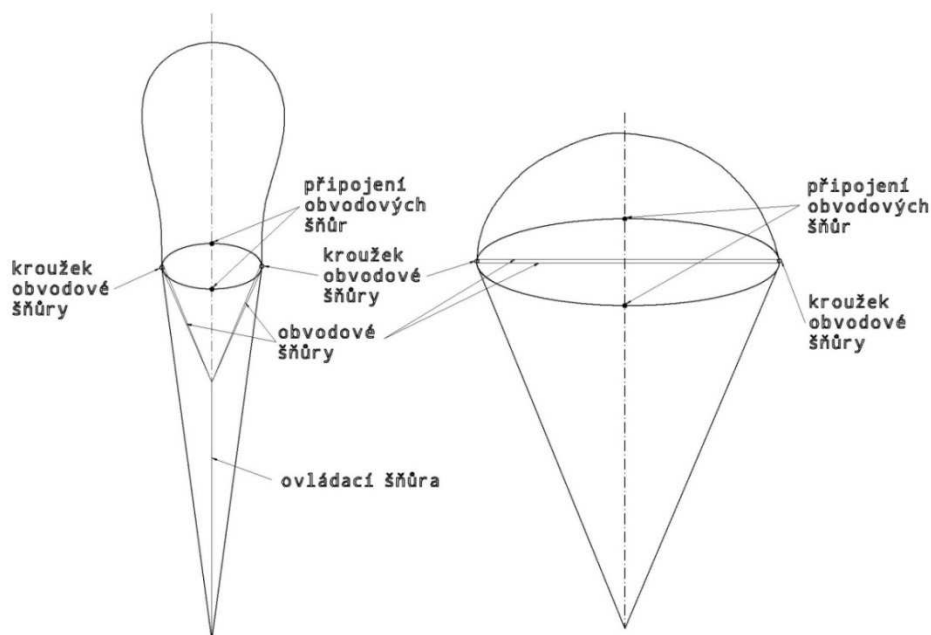


Obr. 8.3 Řízení otevírání pomocí obvodové šňůry.

Variantou metody řízení otevírání pomocí obvodové šňůry je nepoužití pyrotechnických sekačů, ale ovládání pomocí šňůry ovládací viz Obr. 8.5. V tomto případě je obvodová šňůra složena ze dvou částí.



Obr. 8.4 Varianty umístění kroužků obvodové šňůry.



Obr. 8.5 Ovládání obvodové šňůry šňůrou ovládací.

### 8.1.3 Řízení otevírání pomocí středové šňůry

Podstatou této metody je stažení středové šňůry vrchlíku a tím vtažení jeho vrcholu dovnitř viz Obr. 8.6. Tím se zmenší odporová plocha vrchlíku. Po uvolnění středové šňůry potom vrchlík nabude plného tvaru.

Metoda není často používána, protože pro dosažení efektivního zmenšení odporové plochy vrchlíku musí být střed vrchlíku poměrně hodně vtažen, dokonce až pod linii napojení nosných šňůr. V této konfiguraci je potom vrchlík velice nestabilní a při jeho plnění vzduchem může lehce dojít k přeskočení nosných šňůr přes vrchlík a tím k závadě.

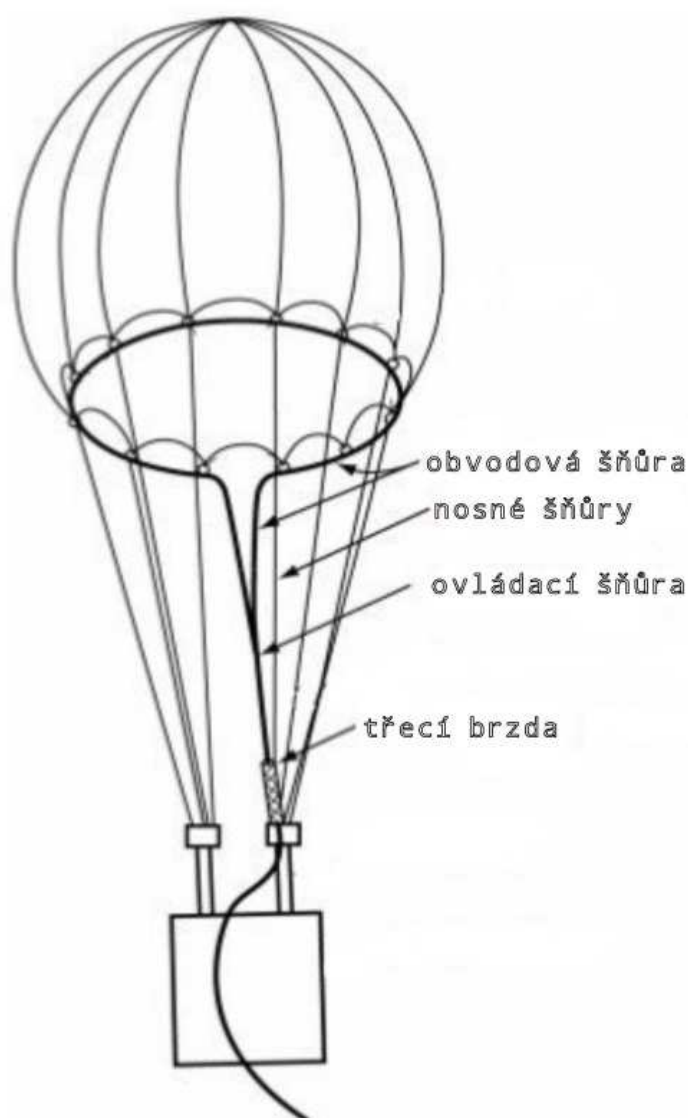


Obr. 8.6 Řízení otevírání pomocí středové šňůry [19].

#### 8.1.4 Řízení otevírání pomocí třecí brzdy

Tato metoda kombinuje řízení otevírání pomocí obvodové šňůry s lineární třecí brzdou, kterou je obvodová šňůra protažena. Velikost třecí síly brzdy je určena velikostí otevírací síly ve volném konci vrchlíku.

Výhodou této metody je její automatickost a kontinuální řízení během celého procesu plnění vrchlíku vzduchem. Nevýhodou je možnost závady třecí brzdy a tím neotevření vrchlíku padáku.



Obr. 8.7 Řízení otevírání pomocí třecí brzdy [36].



## 9 Návrh padáku pro záchrannou soustavu

Po hlubším seznámením se s problematikou a metodami redukce dynamického rázu při otevírání padáku a s využitím dlouholeté praxe v oblasti padákové techniky byla stanovena základní idea návrhu metody řízení otevírání. Touto myšlenkou jakéhokoliv počínání v oblasti padákové techniky je snaha o maximální jednoduchost konstrukčního řešení.

Otevírání padáku a zejména plnění vrchlíku vzduchem je stochastický proces. Navíc v případě padákových záchranných soustav pro letadla probíhá otevírání padáku za rozmanitých vstupních podmínek, zejména rychlosti a počáteční poloze vůči nabíhajícímu proudu vzduchu.

Stejně stochastická je možnost vzniku závady během otevírání padáku.

### 9.1 *Vrchlík padáku pro řízení otevírání pomocí středové šňůry*

Jako nejvhodnější metoda řízení otevírání vrchlíku padáku pro použití u padákových záchranných soustav byla zvolena metoda viz Kap. 8.1.3 řízení otevírání pomocí středové šňůry. Pro potřeby padákových záchranných soustav splňuje požadavky zejména kvůli konstrukční jednoduchosti a možnosti aktivního ovlivnění procesu plnění vrchlíku padáku.

#### 9.1.1 Princip metody

Principem metody je, že středová šňůra vrchlíku padáku je vedena přes pyrotechnický sekač, který je napojen na elektronickou řídící jednotku záchranné soustavy. Tato elektronická jednotka je napojena na rychloměrnou soustavu letadla a vyhodnocuje jeho aktuální rychlost letu. V případě aktivace záchranné soustavy řídící jednotka vyhodnotí aktuální rychlost letu letadla a této rychlosti přiřadí čas, za který bude aktivován pyrotechnický sekač, který přesekne středovou šňůru vrchlíku.

V případě nízké letové rychlosti pyrotechnický sekač okamžitě přesekne středovou šňůru a vrchlík padáku se otevře rychle, jako by nebylo řízení otevírání pomocí středové šňůry použito.

V opačném případě vysoké letové rychlosti se vrchlík padáku otevře v řízeném režimu otevírání pomocí středové šňůry a teprve jakmile dojde ke zpomalení rychlosti, je přeseknuta středová šňůra a vrchlík se plně otevře.

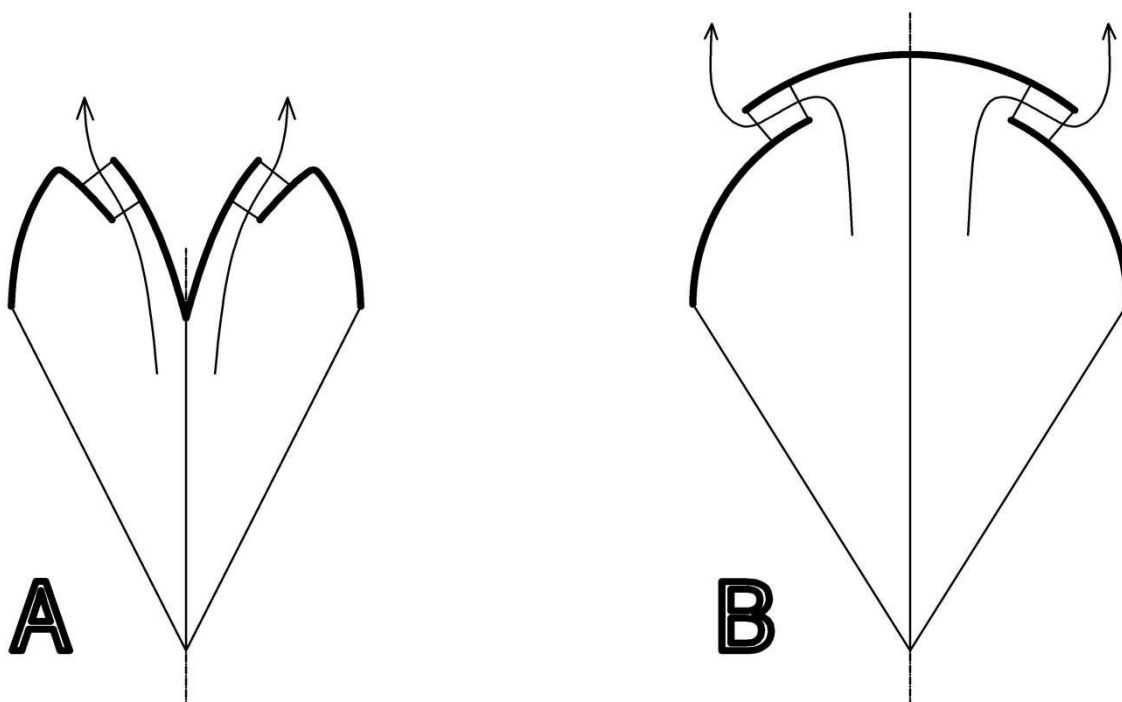
Tímto způsobem lze naladit vrchlík padáku pro široký rozsah rychlostí tak, aby se vždy otevíral blízko horní hranice maximálního použitelného dynamického rázu, resp. násobku přetížení, který je schopna konstrukce vrchlíku a letounu snést.

Nevýhodou této metody je nutnost zajistit přeseknutí středové šňůry v případě selhání elektronické řídicí jednotky nebo pyrotechnického sekače. Jako možné řešení se nabízí použití dalšího nezávislého pyrotechnického sekače s časovým nastavením, který by byl spuštěn při aktivaci záchranné soustavy a po nastaveném čase přesekl středovou šňůru.

### 9.1.2 Návrh vrchlíku

Již z rešerše byla známa hlavní nevýhoda této metody řízení otevírání, kterou je nestabilita vrchlíku padáku při větším stažení středové šňůry, které je ovšem nutné k dosažení menší počáteční odporové plochy vrchlíku padáku.

Proto vznikla snaha modifikovat tvar vrchlíku padáku tak, aby nebylo nutné k dosažení malé počáteční odporové plochy vrchlíku příliš stahovat středovou šňůru a činit tak vrchlík nestabilním. Výsledkem této snahy je konstrukce viz Obr. 9.1. Vrchlík padáku je složen ze dvou částí - spodního prstence a vrchní překrývací plochy kruhového tvaru. Tyto části jsou navzájem spojeny páry spojovacích šňůr. V okamžiku stažení středové šňůry podle Obr. 9.1 varianta A může vzduch proudící do vrchlíku prostupovat volným prostorem mezi oběma částmi. Tím je snížen aerodynamický odpor vrchlíku a zlepšena jeho stabilita díky zvýšenému proudění vzduchu do úplavu za vrchlíkem. Varianta B je plně otevřený vrchlík padáku s přeseknutou středovou šňůrou.



Obr. 9.1 Schéma konstrukce vrchlíku pro řízení otevírání pomocí středové šňůry.

Pro koncepční ověření konstrukce vrchlíku padáku byl ušit plochý celolátkový, kruhový vrchlík o průměru 1,5 m viz Příloha č.1, který byl podroben vlekačím zkouškám za automobilem viz kapitola 11. Následně byl tento vrchlík přešit do podoby podle Obr. 9.1 a viz Příloha č.1 a podroben stejným vlekačím zkouškám. Na základě těchto vlekačích zkoušek bylo použití metody řízení otevírání pomocí středové šňůry u vrchlíku padákové záchranné soustavy zamítnuto.



Obr. 9.2 Modifikovaný vrchlík padáku.



Obr. 9.3 Modifikovaný vrchlík padáku.



Obr. 9.4 Modifikovaný vrchlík padáku.

## **9.2 Vrchlík padáku pro řízení otevírání pomocí dělitelného slideru**

Po zamítnutí varianty vrchlíku s řízením otevírání pomocí středové šňůry se dále nepokračovalo ve snaze o novou konstrukci celého padáku, ale začaly se prověřovat možnosti modifikace stávajících záchranných soustav a systému jejich otevírání.

Každý vrchlík padáku je plně otevřen až tehdy, když se mu podaří pojmout určitý objem vzduchu daný jeho konstrukcí. Tomu odpovídá vzdálenost, kterou musí vrchlík vzduchem urazit. Nejkratší vzdálenost, a tím tedy nejrychlejší naplnění vzduchem, mají vrchlíky bez systému řízení otevírání. Proto vznikla snaha vyvinout takové řešení, které by se pokud možno co nejvíce přiblížilo vrchlíkům bez systému řízení otevírání a tím i fyzikální hranici rychlosti jejich otevření, ale současně aby zůstala zachována funkčnost záchranné soustavy v rychlostech vysokých.

Ideální variantou by tedy bylo v nízkých rychlostech použít vrchlík bez slideru, ve vyšších rychlostech pak vrchlík s řízením otevírání pomocí slideru. Z této úvahy vznikl nápad zkonstruovat dělitelný padákový slider, který by za vyšších rychlostí fungoval stávajícím ověřeným způsobem, ovšem při aktivaci záchranné soustavy při nižších rychlostech by se během otevírání padáku rozdělil a dál tak neomezoval rychlost plnění vrchlíku vzduchem.

### **9.2.1 Konstrukce dělitelného padákového slideru**

Do návrhu konstrukce dělitelného slideru se hned od počátku promítly následující hlavní požadavky:

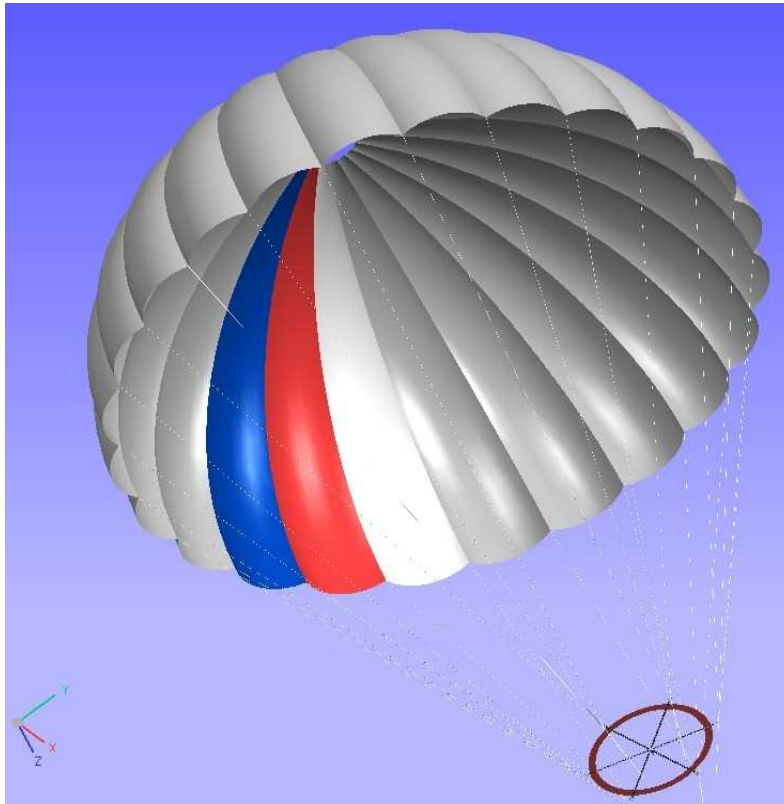
- co nejjednodušší konstrukční řešení,
- bezpečnost při poruše (fail safe),
- možnost implementace do stávajících záchranných soustav.

Dle těchto požadavků byl při navrhování brán ohled na co největší podobnost se stávajícími padákovými slidery záchranných soustav, aby bylo možno v případě použití dělitelného slideru tento pouze zaměnit za původní nedělitelný bez výraznějšího vlivu na otevírací charakteristiky daného padáku.

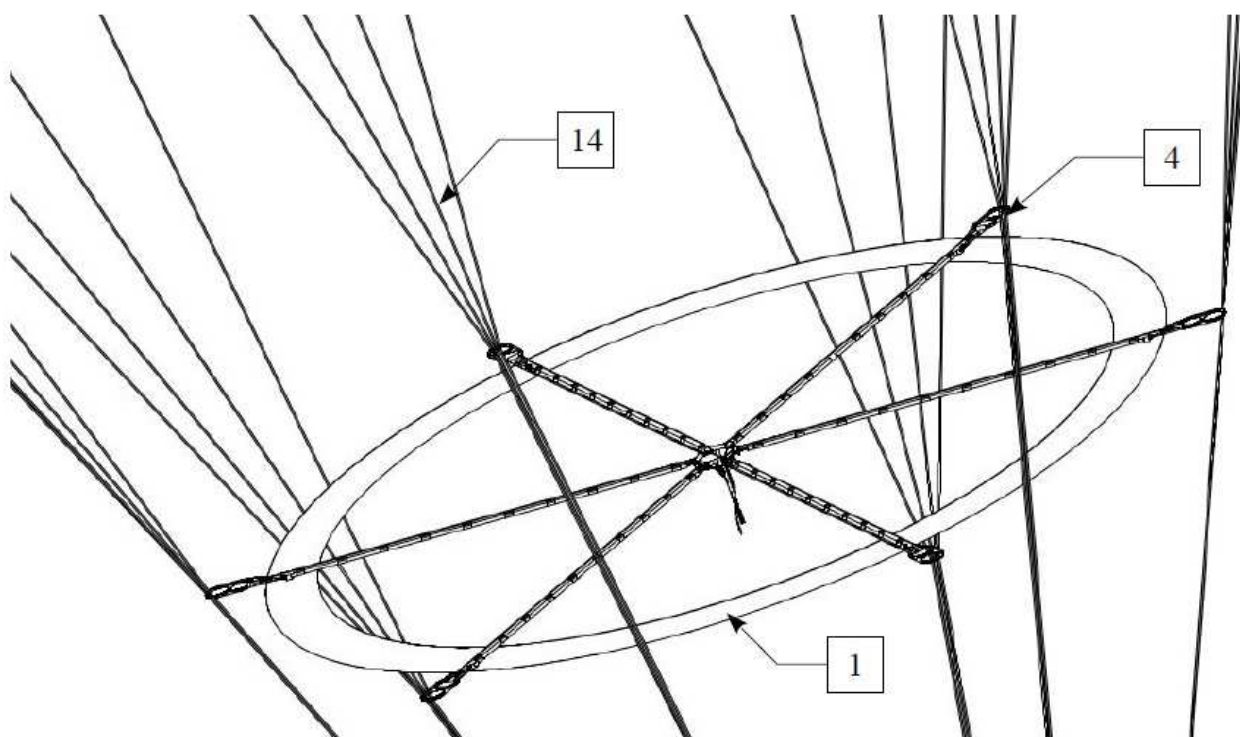
Z hlediska požadavku na maximální jednoduchost bylo v první variantě konstrukce slideru uvažováno, že pyrotechnický sekač se bude aktivovat pro případ pomalého - sliderem řízeného otevření vrchlíku. V případě, že nastanou podmínky pro rychlé otevření padáku, pyrotechnický sekač aktivován nebude. Po konstrukční stránce je tato varianta jednodušší, je zde ovšem vážná hrozba, že v případě aktivace soustavy při vysoké rychlosti a eventuálnímu selhání sekací soustavy dojde k rychlému otevření padáku, a tím díky velkému dynamickému rázu k téměř jisté destrukci buď vrchlíku padáku nebo konstrukce letadla v místech připojení padákové záchranné soustavy.



Proto byla zvolena konstrukčně složitější varianta, a to aktivovat pyrotechnický sekač v případě potřeby rychlého otevření padáku, tzn. bez slideru. Důvodem je „fail safe“ metoda návrhu, která se týká zejména možnosti selhání řídicí jednotky a pyrotechnického sekače. Při tomto řešení se při selhání sekací soustavy vrchlík otevře vždy ve sliderem řízeném režimu, tzn. stejně jako dnes používané záchranné soustavy, a tedy bez ohrožení celkové funkčnosti.

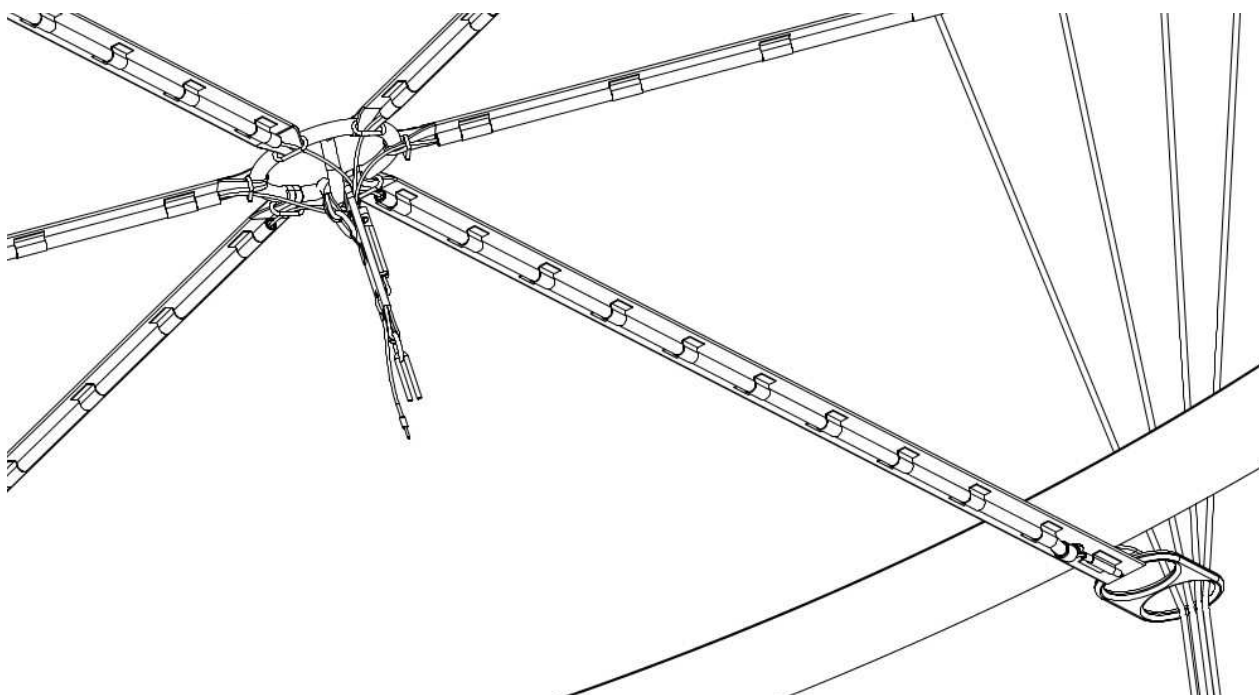


Obr. 9.5 Padák s dělitelným sliderem.

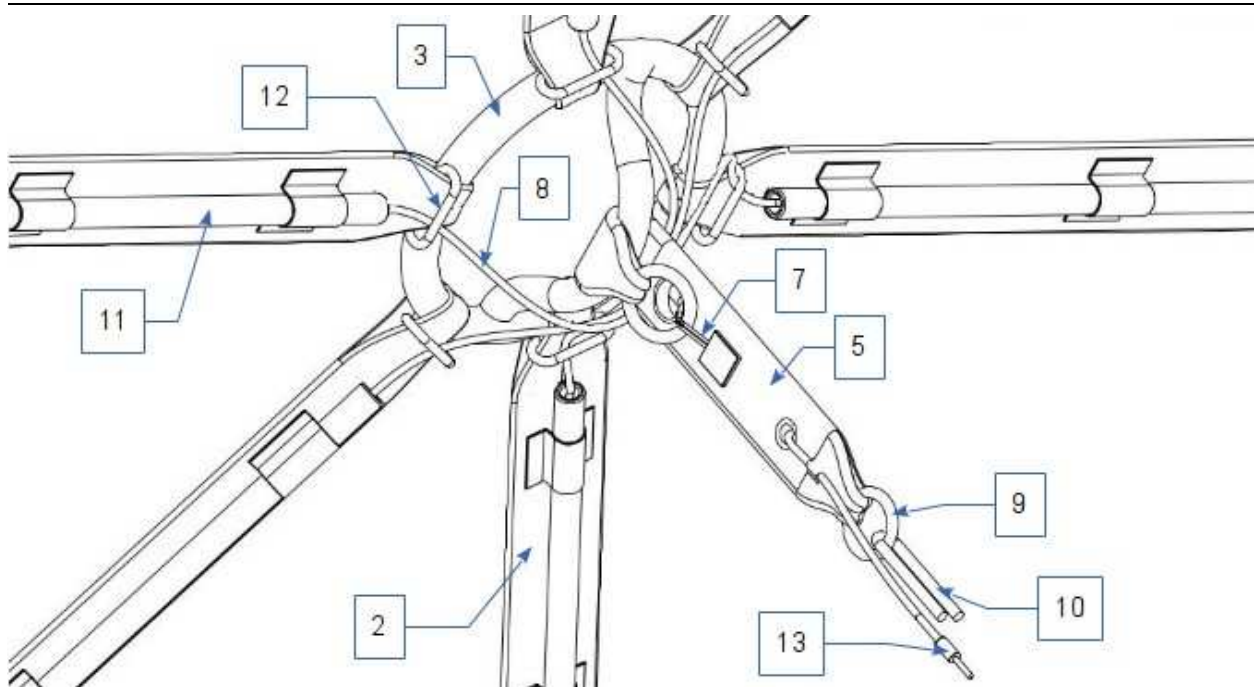


Obr. 9.6 Dělitelný padákový slider.

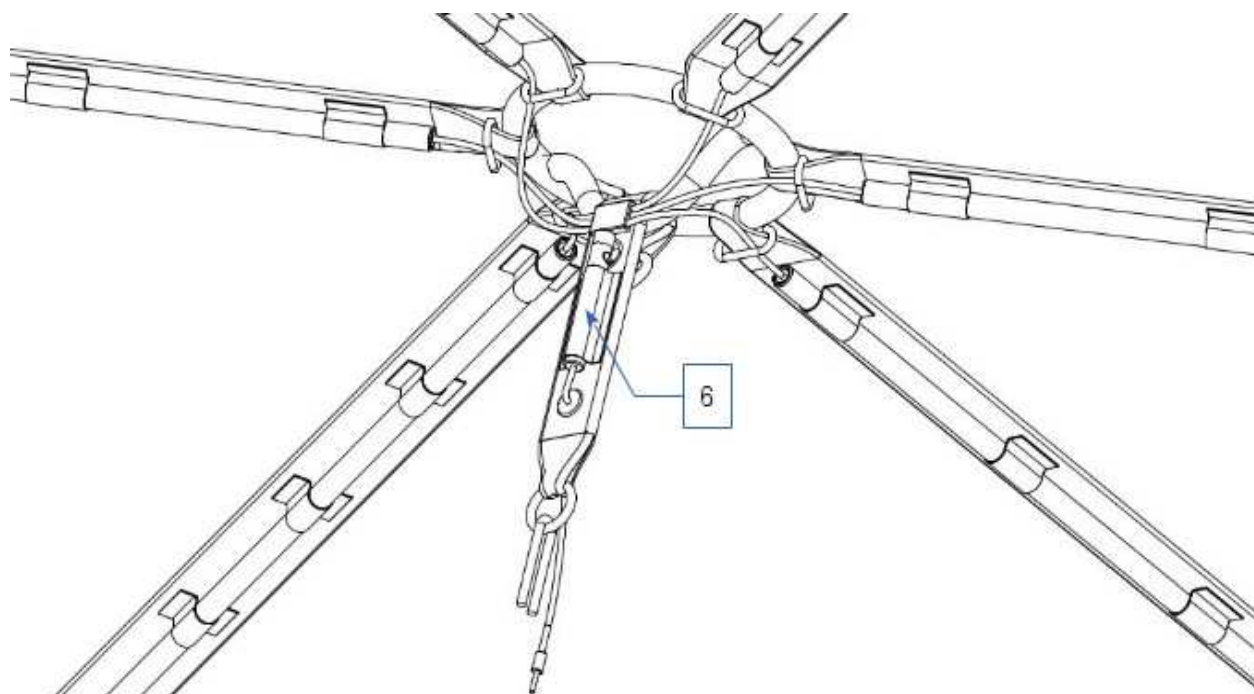
Na Obr. 9.6 je znázorněn celkový pohled na dělitelný padákový slider v nerozděleném stavu, kterým prochází nosné padákové šňůry. V této konfiguraci řídí slider otevírání vrchlíku při vyšších aktivačních rychlostech ověřeným a používaným způsobem.



Obr. 9.7 Dělitelný padákový slider.

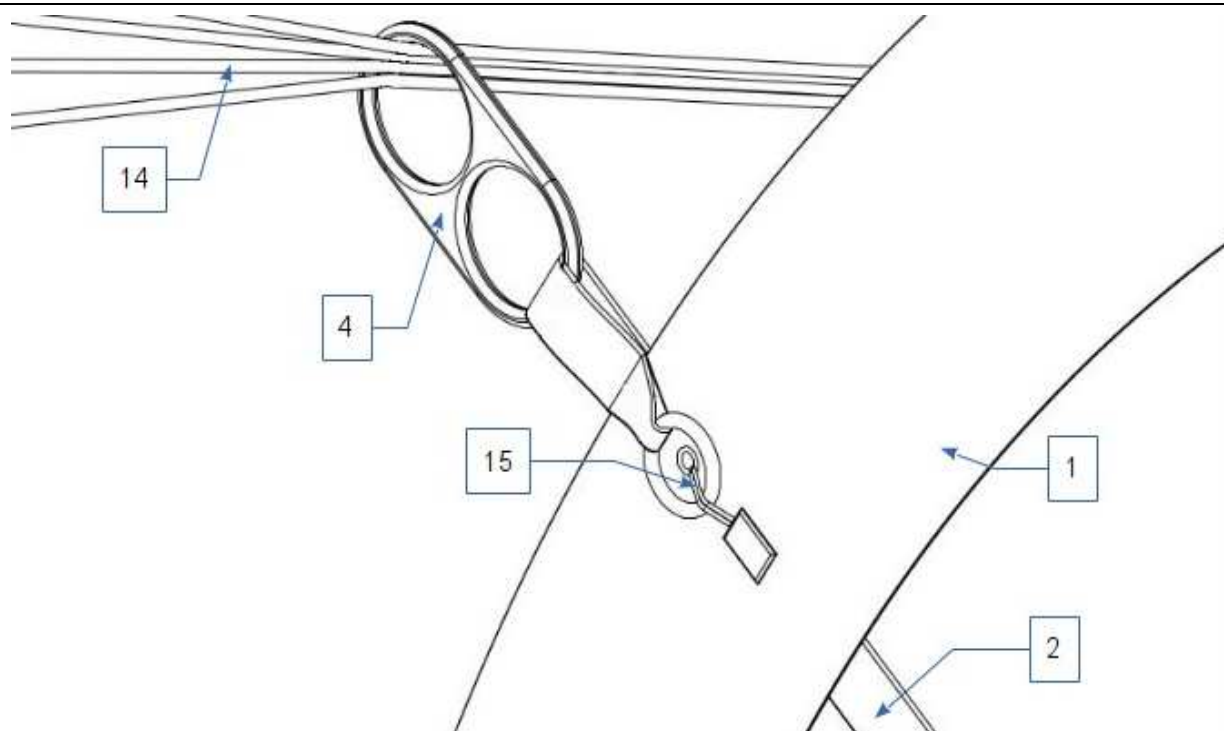


Obr. 9.8 Konstrukce centrální části dělitelného slideru.

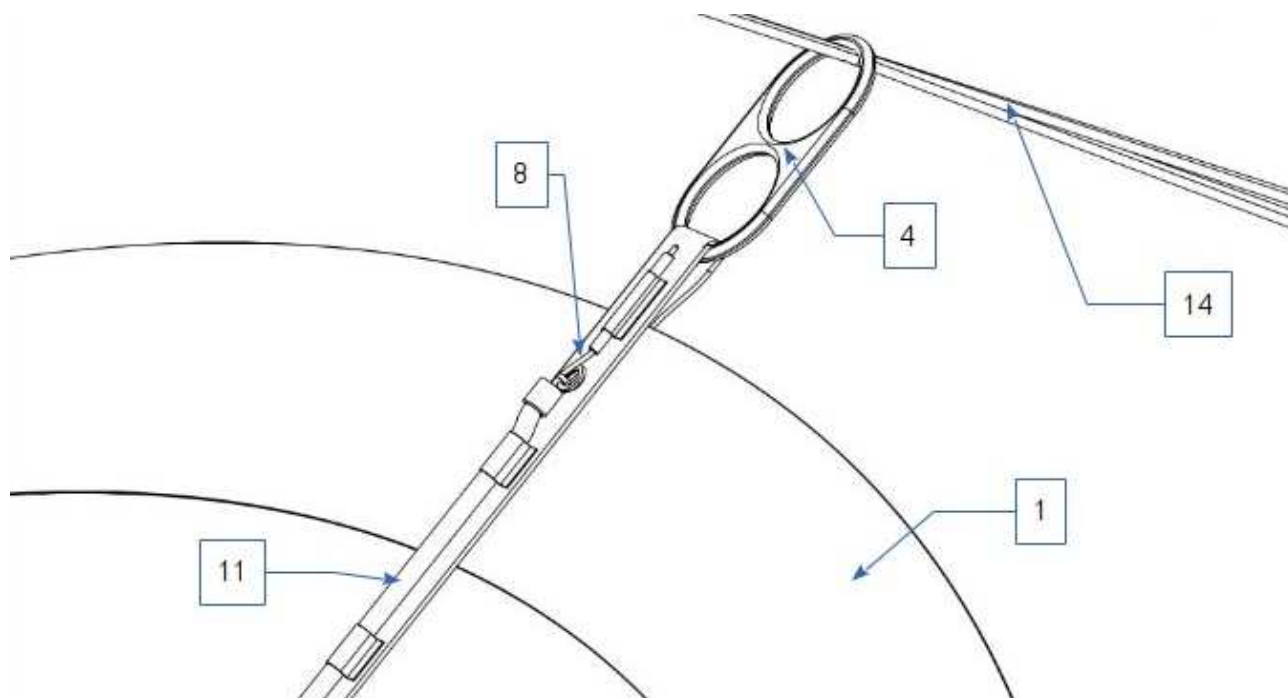


Obr. 9.9 Konstrukce centrální části dělitelného slideru.





Obr. 9.10 Konstrukce mechanismu dělení po obvodě prstence slideru.



Obr. 9.11 Konstrukce mechanismu dělení po obvodě prstence slideru.

Z hlediska funkce se dělitelný slider skládá ze dvou hlavních částí viz Obr. 9.6, 9.8, 9.9, 9.10, 9.11:

### **1. Konstrukce slideru určující jeho tvar a vytvářející aerodynamický odpor**

Hlavním prostředkem vytvářejícím aerodynamický odpor je kruhový prstenec (1), který je vyroben buď z padákové tkaniny nebo propustné síťoviny. K němu je našito 6 popruhů (2) spojených ve středu slideru pomocí centrálního kování (3). Na konci každého popruhu jsou rozpojitelným dvoukroužkovým zařízením (15) připojeny průchodky (4) ve tvaru osmičky, kterými prochází nosné šňůry vrchlíku (14).

### **2. Zařízení pro dělení padákového slideru**

Toto zařízení se skládá z centrálního volného konce (5), který je na jedné straně rozpojitelným dvoukroužkovým zařízením připojen k centrálnímu kování (3). Součástí dvoukroužkového zařízení je pyrotechnický sekač (6), který je přišit k centrálnímu volnému konci (5) a rozpojitelným konektorem (13) připojen k aktivační jednotce. Tímto sekačem prochází očko (7). Dále jsou k centrálnímu volnému konci připevněna ocelová lanka s teflonovým potahem (8). Na druhé straně je centrální volný konec opatřen „O“ kroužkem (9), přes který je spojen s kontejnerem vrchlíku pomocí trhací šňůry (10).

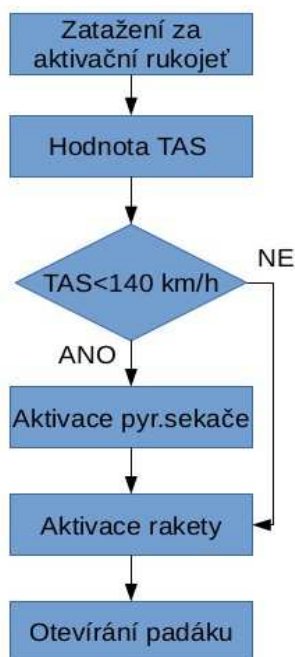
Na popruzích (2) jsou umístěny pomocné kroužky (12), jejichž funkce je v zabránění utržení bowdenu (11) z popruhu při vytahování ocelových lanek. Dále jsou na popruzích našity bowdeny (11), kterými jsou vedena ocelová lanka (8) k jednotlivým dvoukroužkovým zařízením (15) pro oddělení průchodek (4) po obvodě prstence slideru (1).

## **9.3 Mechanismus otevírání padáku vybaveného dělitelným sliderem**

Rozhodující veličinou pro volbu módu otevírání je aktuální rychlost letu v okamžiku aktivace záchranné soustavy. Elektronická jednotka záchranné soustavy je napojena na rychloměrnou soustavu letadla a z dynamického tlaku vyhodnocuje odpovídající rychlost letu. Není nutná zvláštní přesnost určení rychlosti, pouze v případě nutnosti velké polohové opravy u daného letadla, je nutno toto brát v potaz.

V okamžiku aktivace záchranné soustavy, při zatažení za aktivační rukojeť, je odeslán signál do řídicí jednotky, která vyhodnotí naprogramovanou logikou, zda:

- dojde k aktivaci pyrotechnického sekače a padák se bude otevírat rychle,
- nedojde k aktivaci pyrotechnického sekače a padák se bude otevírat pomalu ve sliderem řízeném režimu.



Obr. 9.12 Mechanismus otevření padáku.

### 9.3.1 Otevření padáku, při kterém se slider rozdělí

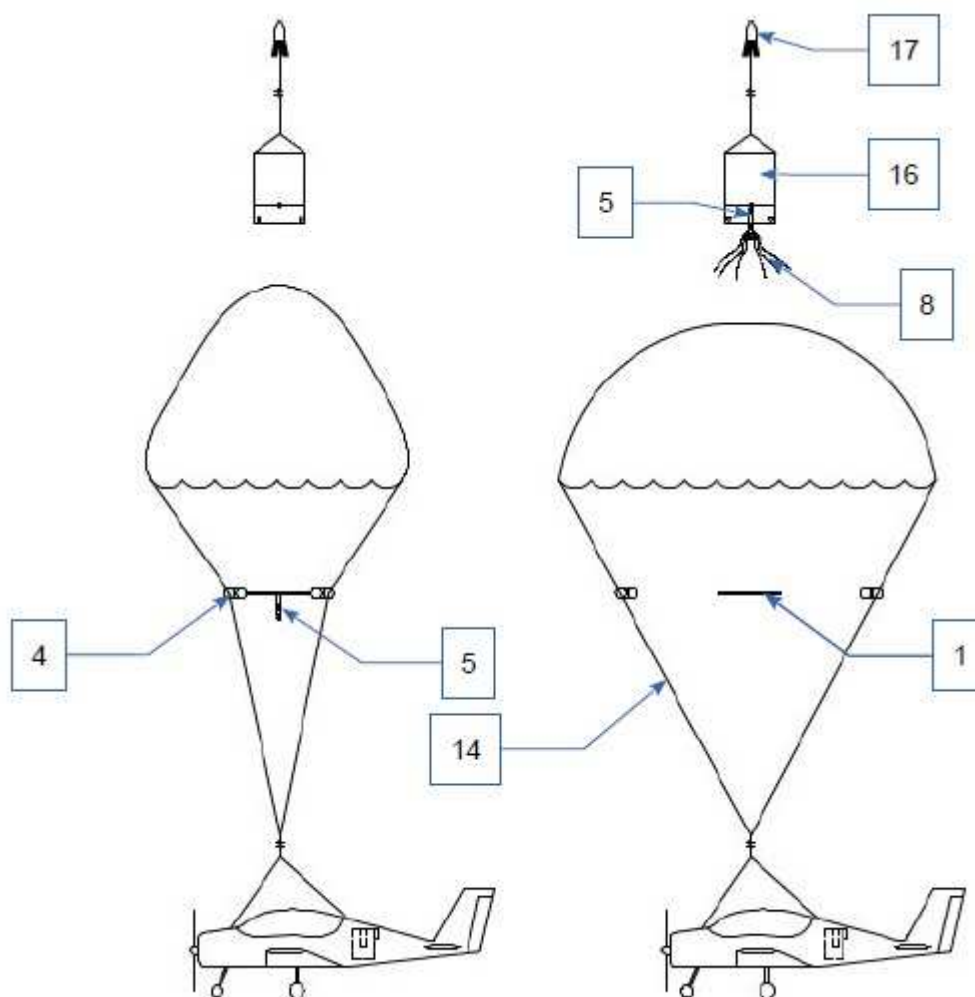
Po zatažení za aktivační rukojeť (18) řídící jednotka (19) vyhodnotí, že rychlost letu je nižší, než  $140 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ , tudíž spustí pyrotechnický sekač (6), který přeseke očko (7) centrálního volného konce slideru (5), který je připojen k centrálnímu kování (3) a kontejneru vrchlíku (16). Téměř současně je aktivována raketa (17), která začne vytahovat kontejner (16) s vrchlíkem padáku a rozpojuje se konektor pyrotechnického sekače (13).

V okamžiku plného natažení nosných šňůr (14) je otevřen kontejner vrchlíku (16) a začíná se z něj vytahovat vrchlík padáku. Jelikož je centrální volný konec (5) spojen s kontejnerem vrchlíku (16) trhací šňůrkou (10) a díky aktivaci pyrotechnického sekače (6) již není centrální volný konec (5) spojen s centrálním kováním (3), nebude přetržena trhací šňůrka (10) a dojde k vytažení lanek (8) z bowdenů (11), a tím k odpojení krajních průchodek (4). Slider jako takový volně odpadne.

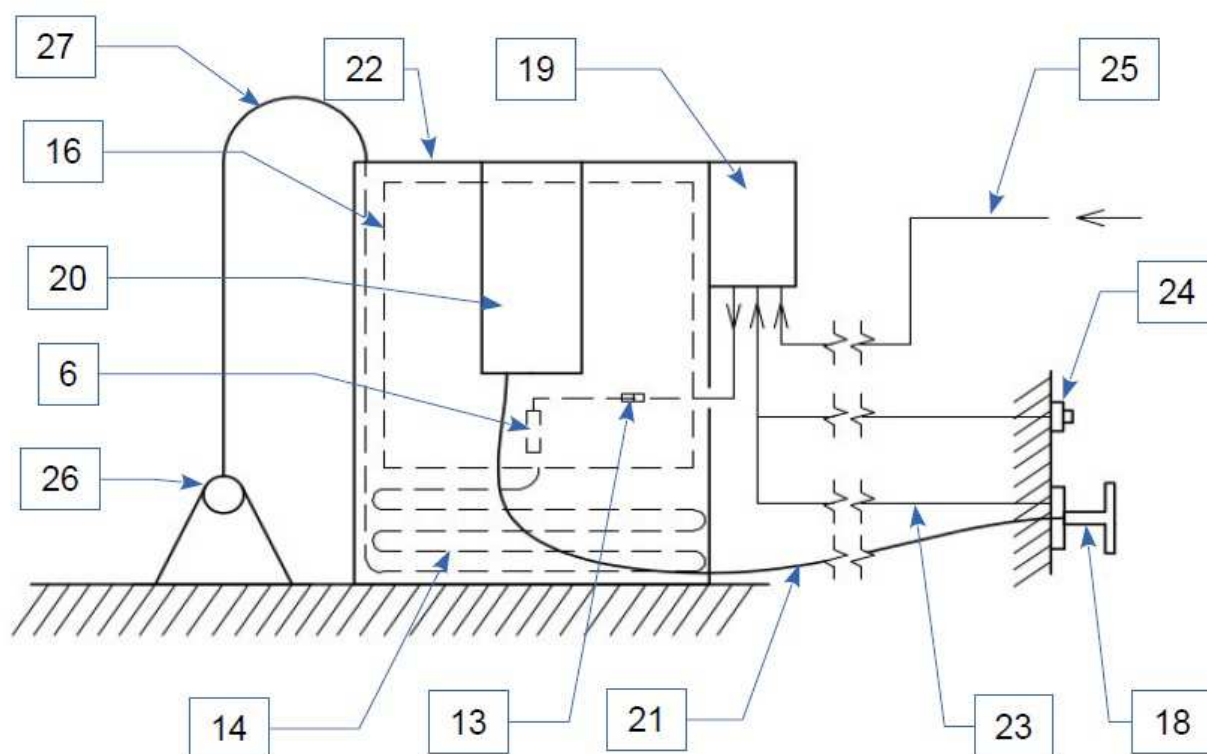
Na nosných šňůrách vrchlíku (14) zůstávají pouze průchodky (4), které během plnění vrchlíku sjedou po nosných šňůrách dolů k napojení nosných šňůr. Vrchlík je tedy dále vytahován z kontejneru (16) a plní se vzduchem bez toho, aby byl sliderem omezován. Kontejner vrchlíku (16) s centrálním volným koncem (5) a lanky (8) pokračuje dál, dokud nevyhoří raketě palivo.

### 9.3.2 Otevření padáku se sliderem

Po zatažení za aktivační rukojeť (18) řídící jednotka (19) vyhodnotí že rychlost letu je vyšší, než  $140 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ , tudíž nespustí pyrotechnický sekač (6), který nepřeseke očko (7) centrálního volného konce slideru (5), který je připojen k centrálnímu kování (3) a kontejneru vrchlíku (16). Téměř současně je aktivována raketa (17), která začne vytahovat kontejner (16) s vrchlíkem padáku a rozpojuje se konektor pyrotechnického sekače (13). V okamžiku plného natažení nosných šňůr (14) je otevřen kontejner vrchlíku (16) a začíná se z něj vytahovat vrchlík padáku. Jelikož pyrotechnický sekač (6) nespustil, zůstává centrální volný konec (5) spojen s centrálním kováním (3) a dochází k přetržení trhací šňůrky (10), která spojuje kontejner vrchlíku (16) s volným koncem slideru (5). Slider tedy zůstává na svém místě a během otevírání vrchlíku brzdí svým pohybem jeho rychlé plnění vzduchem. Kontejner vrchlíku (16) pokračuje dál, dokud nevyhoří raketě palivo.



Obr. 9.13 Schéma otevírání padáku se sliderem a při rozdělení slideru.

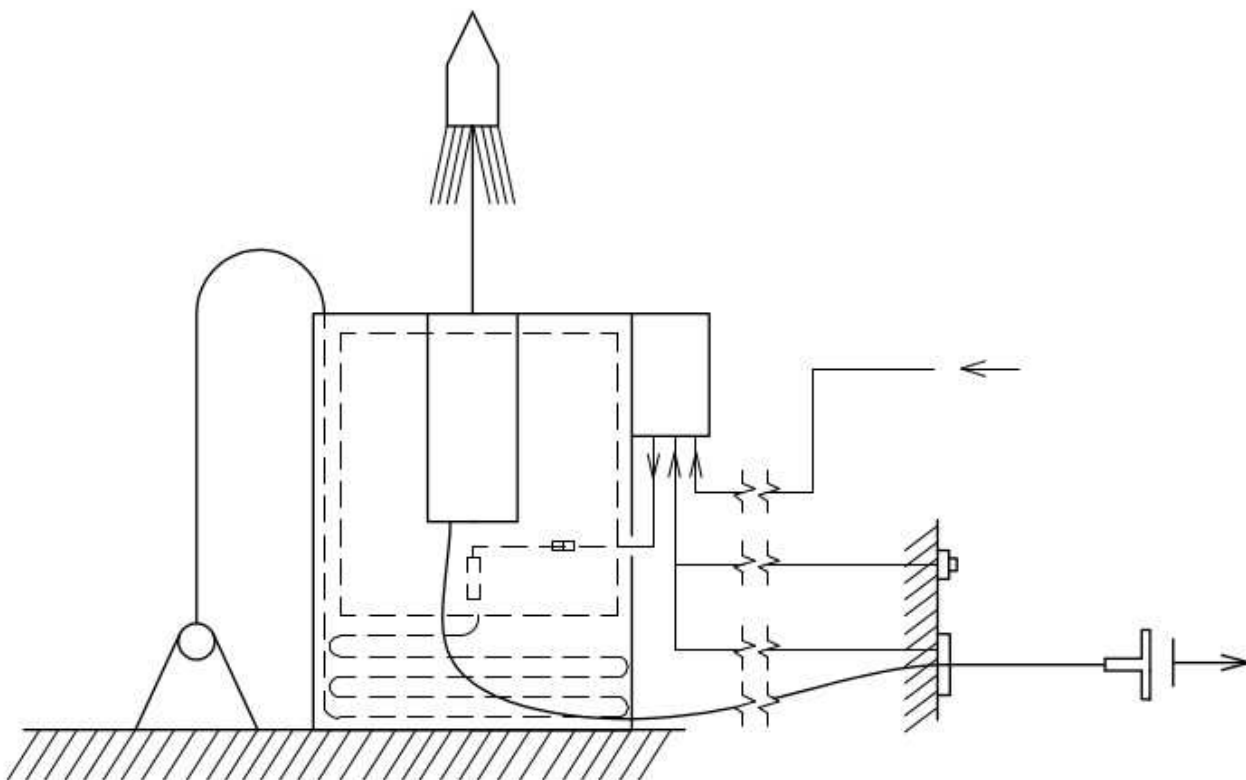


Obr. 9.14 Schéma padákové záchranné soustavy před aktivací.

Na Obr. 9.14 je schématicky znázorněna padáková záchranná soustava, jak by mohla být umístěna v letadle před aktivací. Záchranná soustava se tedy skládá z kontejneru záchranné soustavy (22), ve kterém jsou složeny nosné šňůry padáku (14) a uložen kontejner vrchlíku (16). Na kontejner záchranné soustavy (22) je připevněna raketnice (20) a řídicí jednotka pyrotechnického sekače (19). Raketnice i řídicí jednotka nemusejí být součástí kontejneru záchranné soustavy. Padák je pomocí spojovacího popruhu (27) schématicky upevněn v kotevním bodě (26).

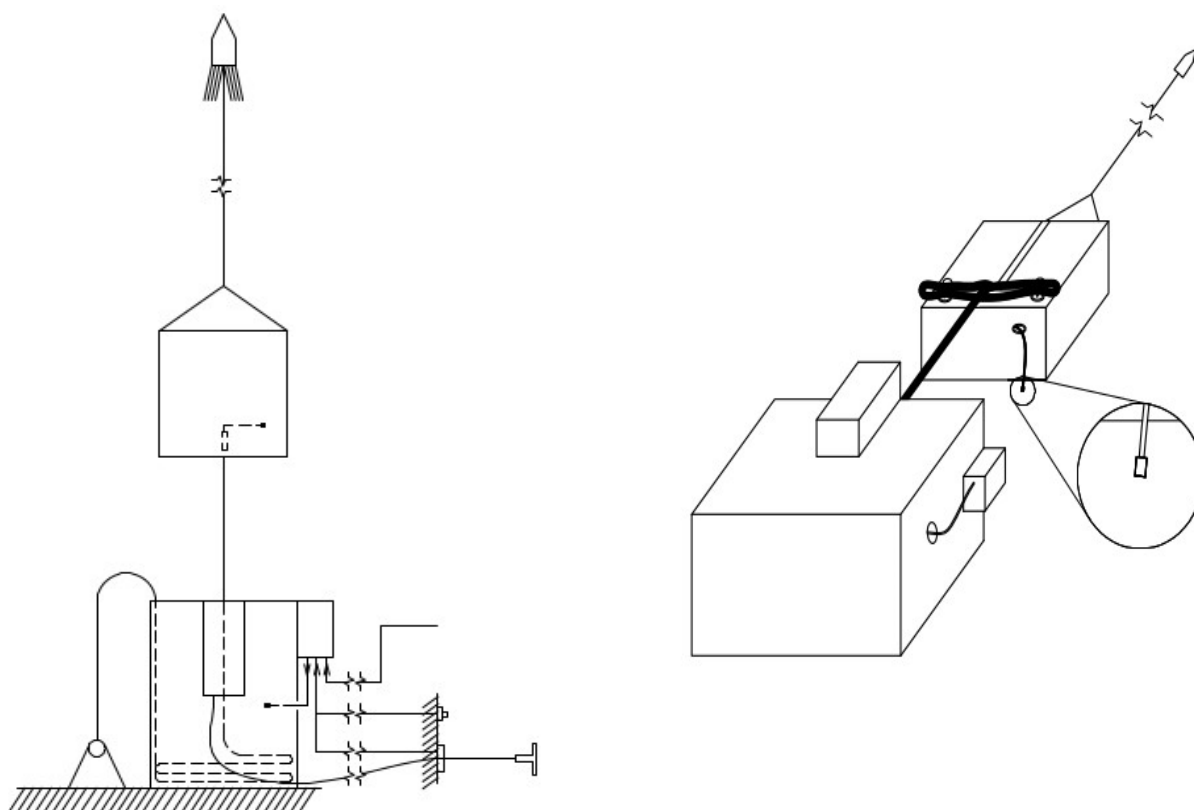
K aktivaci záchranné soustavy slouží aktivační rukojeť (18), která je jednak mechanicky spojena pomocí ocelového lanka vedeného v bowdenu (21) s raketnicí a též elektricky spojena s aktivační jednotkou pyrotechnického sekače (19). Řídicí jednotka (19) na základě vstupních dat z tlakového čidla rychloměrné soustavy letadla (25) spouští na pokyn vstupu (23) nebo (24) pyrotechnický sekač (6) připojený přes rozpojitelný konektor (13) k řídicí jednotce.

Manuální aktivace pyrotechnického sekače pomocí tlačítka (24) je u záchranných padákových soustav spíše nepravděpodobná, ovšem také možná.

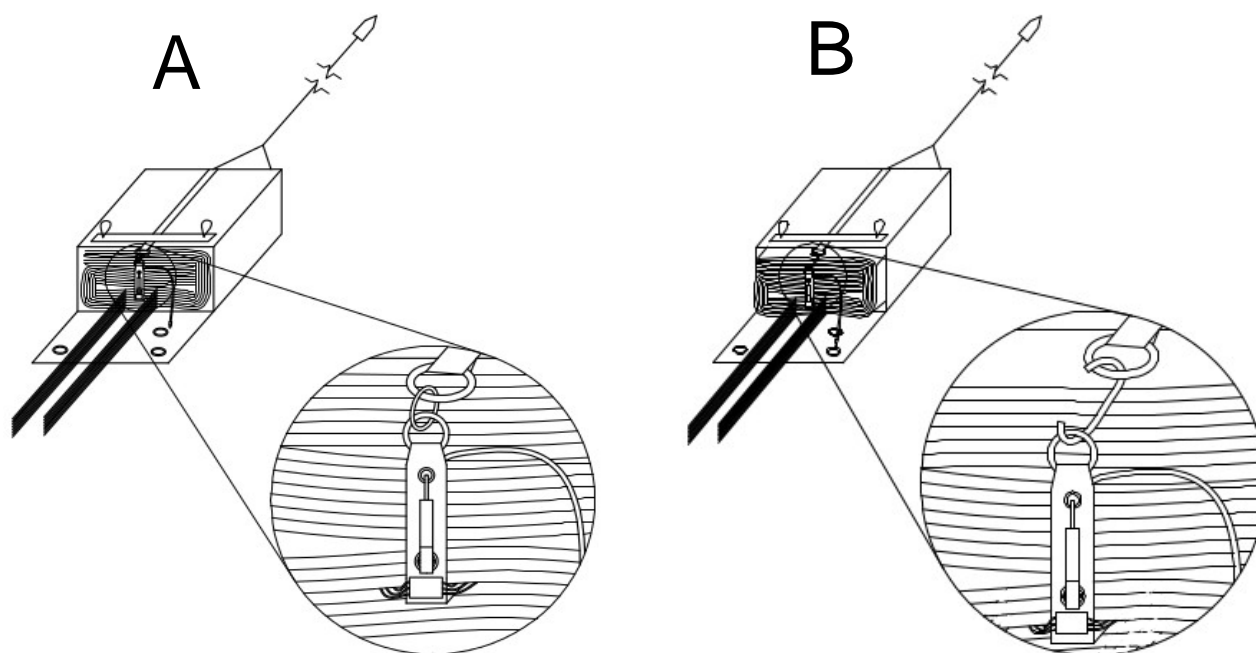


Obr. 9.15 Schéma padákové záchranné soustavy krátce po aktivaci.

Obr. 9.15 zobrazuje padákovou záchrannou soustavu krátce po její aktivaci zatažením za aktivační rukojeť (18). V tomto okamžiku již řídicí jednotka na základě vstupních dat z tlakového čidla (25) vyslala signál pyrotechnickému sekači (6) a přesekl očko (7). Aktivační rukojeť (18) je spojena s raketnicí mechanicky, lankem v bowdenu (21), tudíž než dojde tažením rukojeti k natažení úderníku spouštějícího zápalky raketové náplně, je zde časový interval pro vyhodnocení rychlosti letu a případné spuštění pyrotechnického sekače (6).



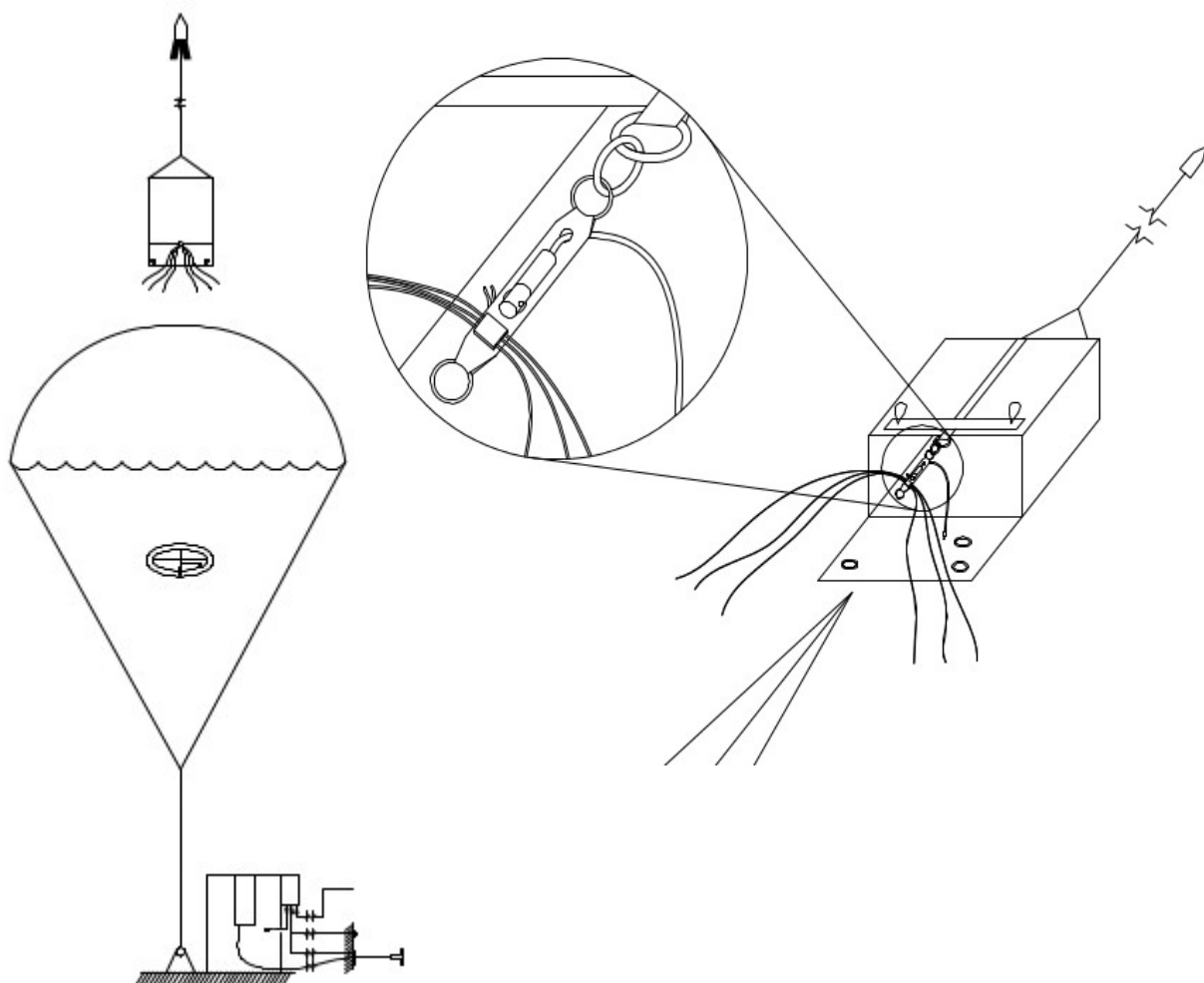
Obr. 9.16 Vytahování kontejneru vrchlíku.



Obr. 9.17 Varianty otevírání padáku.



Na Obr. 9.17 je znázorněn okamžik otevření kontejneru vrchlíku. Ve variantě „A“ byl pyrotechnický sekač aktivován, tudíž se slider rozdělí. Ve variantě „B“ k aktivaci pyrotechnického sekače nedošlo, tudíž se dalším pohybem kontejneru vrchlíku přetrhne trhací šňůra a padák se otevře v sliderem řízeném režimu.



Obr. 9.18 Otevření padáku při kterém se slider rozdělil.

## 10 Výpočetní návrh kruhového vrchlíku pro padákovou záchrannou soustavu

Pro většinu výpočtů v oblasti padáků platí, že simulované výsledky se mohou značně odchylovat od reality, k čemuž vedou dva hlavní důvody:

matematické modely fyzikálních procesů jsou výrazně zjednodušeny - padákové problémy jsou nelineární, trojrozměrné a zejména stochastické, v nichž je rozložení tlaku závislé na tvaru vrchlíku a flexibilní tvar vrchlíku závisí na rozložení tlaku;

parametry používané v matematických modelech jsou v lepším případě čerpány z nepříliš dokonalých měření a nebo jsou více či méně inteligentními odhady.

Výpočet tedy slouží zejména k prvotnímu odhadu parametrů. U známých, v reálných podmínkách ověřených vrchlíků, by měl výpočet poskytnout uspokojivé výsledky a ukázat směr pro případnou další optimalizaci.

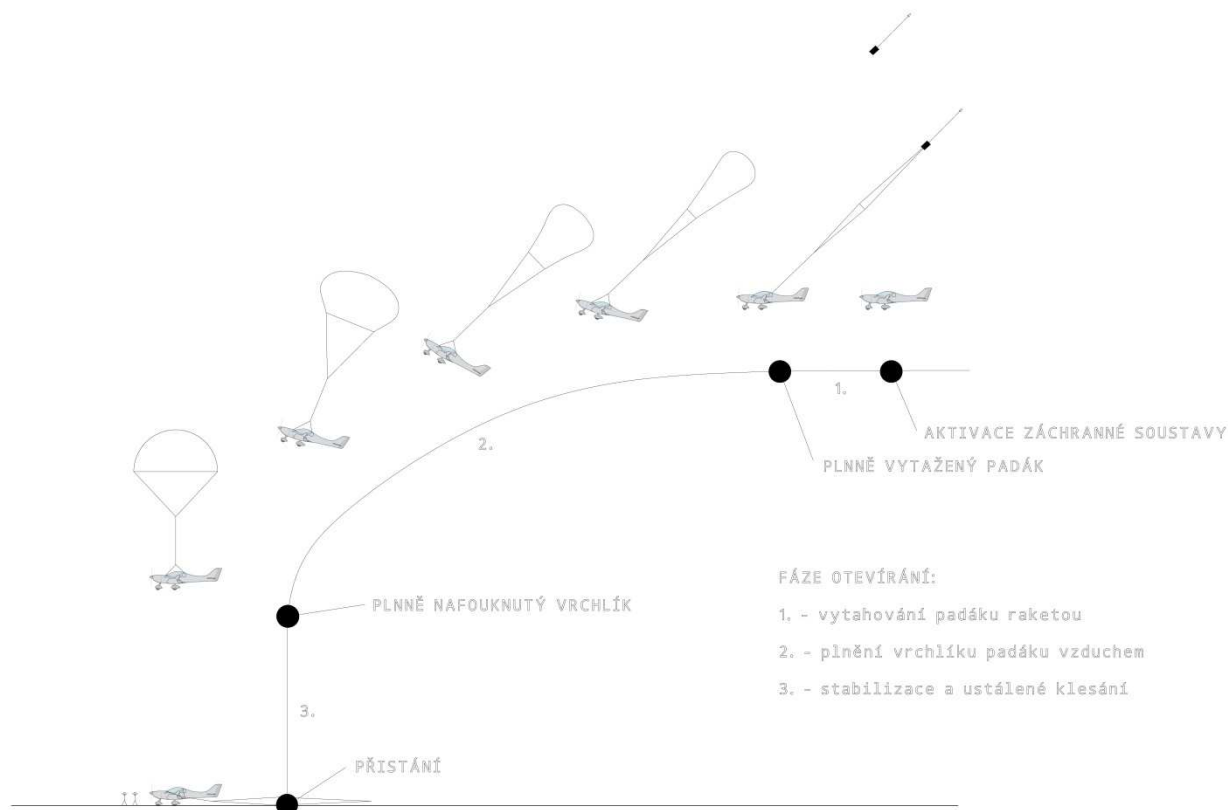
### 10.1 Vstupní parametry pro výpočet vrchlíku bez slideru

Pro prvotní návrh je výhodné provést rešerši užívaných padáků pro záchranné soustavy, ze které se určí základní parametry vrchlíku jako je jeho tvar, profil, plocha, počet nosných šňůr, atd.

Pro výpočet jednotlivého případu otevření kruhového vrchlíku je nutné znát následující základní parametry:

- $W$  celková tíha soustavy (včetně padáku),
- $\rho$  hustota vzduchu odpovídající výšce aktivace  $h$ ,
- $V_s$  rychlost letu (pádu) v okamžiku aktivace záchranné soustavy,
- $\varphi$  úhel trajektorie letu v okamžiku aktivace záchranné soustavy,
- $C_D$  koeficient odporu vrchlíku padáku,
- $S_0$  celková (nominální) plocha vrchlíku padáku.

## Jednotlivé fáze otevírání padákové záchranné soustavy



Obr. 10.1 Fáze otevírání padákové záchranné soustavy.

- **Okamžik aktivace záchranné soustavy  $T_0$**

Aktivace záchranné soustavy, která se provede zatažením za aktivační rukojeť, je počátkem otevírání  $T_0$ .

- **Fáze vytahování padáku raketou  $(T_0, T_s)$**

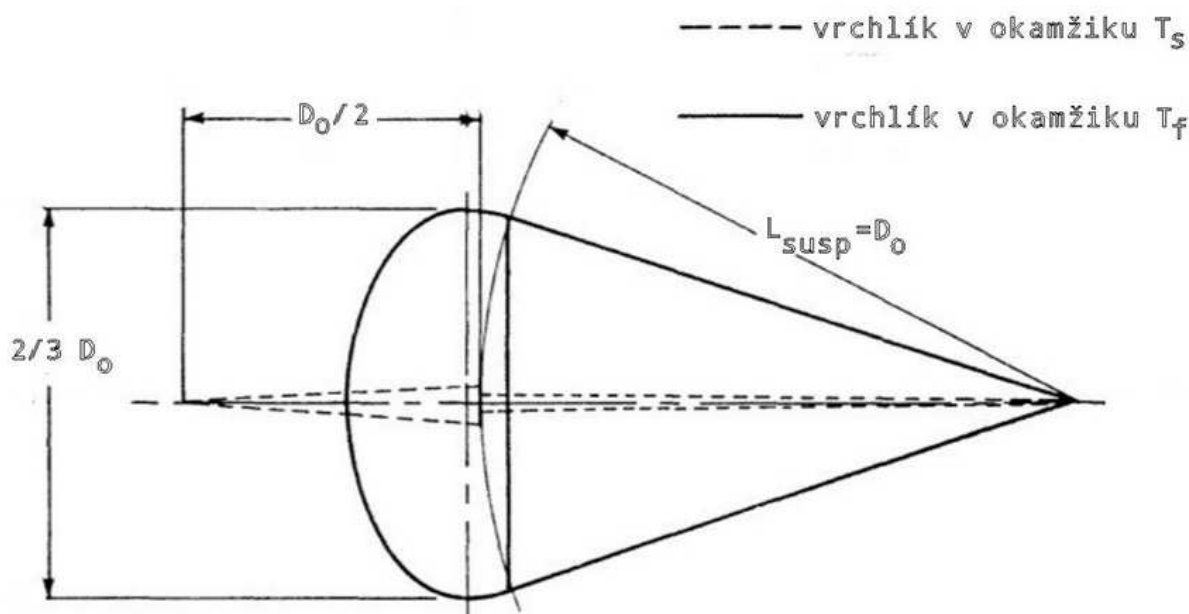
Tato fáze se počítá od okamžiku aktivace, do plného natažení padáku - tzn. plné natažení nosných šňůr. Čas  $T_s$  je též okamžikem oddělení kontejneru vrchlíku, který s raketou pokračuje dále.

- **Fáze plnění vrchlíku padáku vzduchem  $(T_s, T_f)$**

Fáze od začátku plnění  $T_s$ , do nafouknutí vrchlíku  $T_f$ .

- **Fáze stabilizace a ustáleného klesání  $(T_f, T_l)$**

Fáze stabilizace a poté ustálené klesání a přistání  $T_l$ .



Obr. 10.2 Geometrie vrchlíku padáku při použití vaku vrchlíku.

## 10.2 Fáze vytahování padáku raketou

Letadlo se v okamžiku aktivace záchranné soustavy může nacházet v jakékoliv pozici, a to nejen letové - například v případě destrukce draku letounu.

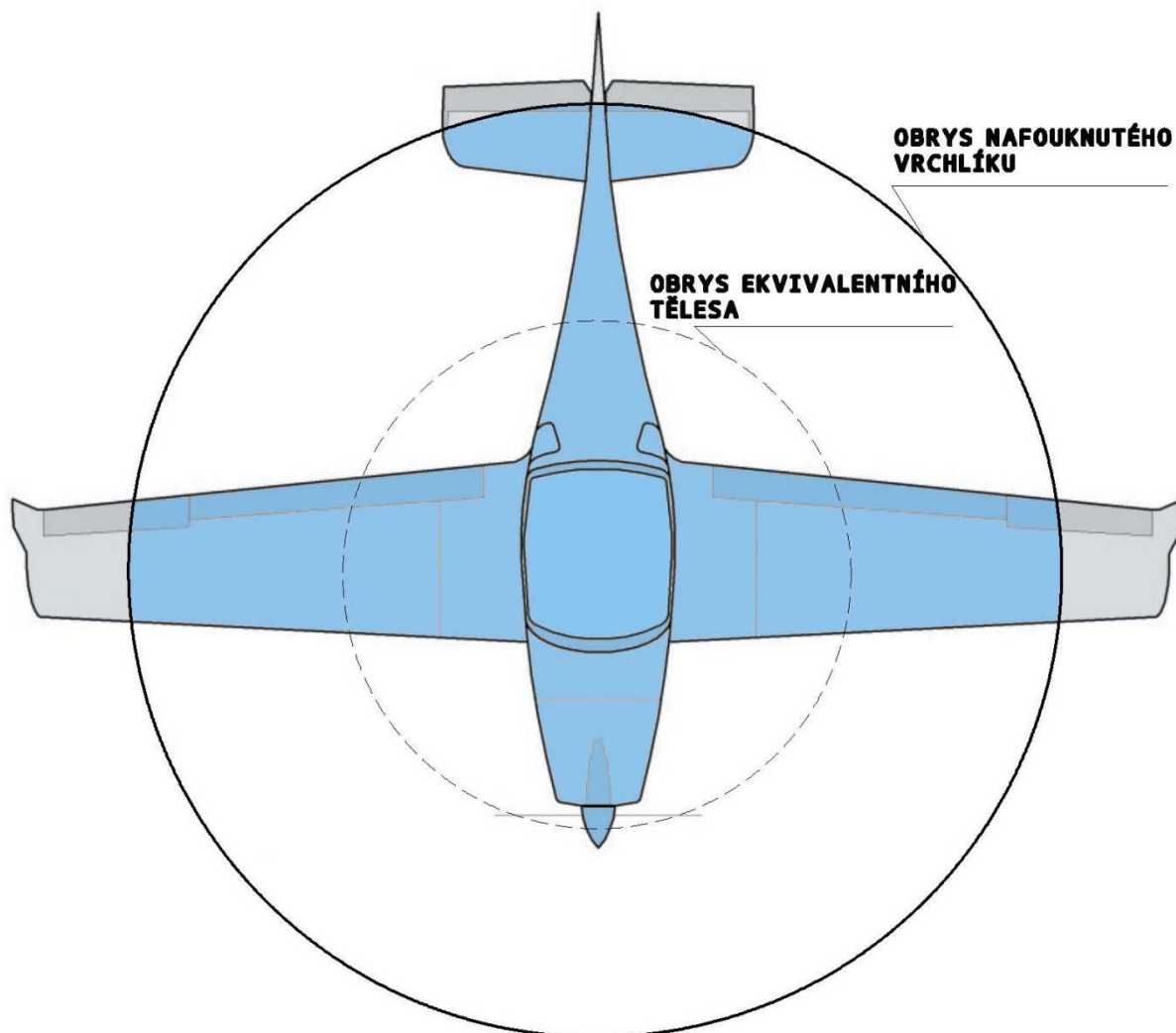
Padák je velice rychle (méně než za vteřinu) vytažen raketou, může se tedy v okamžiku plného vytažení ocitnout v jakékoli pozici vůči nabíhajícímu proudu vzduchu - opět záleží na pozici letadla v okamžiku aktivace záchranné soustavy.

Padák není k letadlu ukotven přímo v těžišti, ale zpravidla pomocí 4 kotevních popruhů. První silový impuls od nafukujícího se padáku tedy může výrazně ovlivnit pozici letadla vůči nabíhajícímu proudu vzduchu. Časté je ovlivnění letadla do stavu „těžké na ocas“ a tím jeho chvilkové stoupání. Vrchlík se potom může začít plnit téměř pod letadlem.

Doba trvání této fáze je tedy doba, za kterou raketa záchranné soustavy plně natáhne vrchlík padáku i se šňůrami.

### 10.3 Fáze plnění vrchlíku padáku vzduchem

V této fázi hraje nezanedbatelnou roli tzv. efekt podvěšeného tělesa, který znamená míru ovlivnění obtékání vrchlíku padáku tvarem a velikostí tělesa pod ním zavěšeného.



Obr. 10.3 Vizualizace velikosti ekvivalentní plochy pro efekt podvěšeného tělesa letounu Dynamic.

Je ověřeno dle [19], aby z důvodu ovlivnění nabíhajícího proudu vzduchu podvěšené těleso válcového průměru bylo nejméně 4, ale spíše 6ti násobek jeho průměru vzdáleno od vrchlíku padáku. Pro zanedbání ovlivnění nabíhajícího proudu vzduchu podvěšeným tělesem se doporučuje desetinásobek průměru podvěšeného tělesa.

Pokud není podvěšené těleso válcového tvaru (kruhového průřezu), převede se jeho plocha, která je ohraničena obvodem nafouknutého vrchlíku padáku, na ekvivalentní plochu kruhovou (viz čárkovaná kružnice na Obr. 10.3.)

Pro příklad byl vybrán letoun Dynamic s rozpětím křídel 9 m a plochý, celolátkový kruhový vrchlík o ploše  $S_0 = 100\text{m}^2$  s počtem nosných šňůr 24, jehož obtékaný průměr je roven:

$$D_{inf} = \frac{2}{3} \sqrt{\frac{4S_0}{\pi}} = 7,52\text{ m}. \quad (10.1)$$

Plocha letounu ohraničená obvodem nafouknutého vrchlíku padáku je  $S_B = 12,1\text{m}^2$  (modře zvýrazněná), přepočítaná na plochu kruhovou o průměru  $D_B$ :

$$D_B = \sqrt{\frac{4S_B}{\pi}} = 3,92\text{m}. \quad (10.2)$$

Z tohoto výpočtu vyplývá, že hraniční vzdálenost vrchlíku padáku od podvěšeného letounu Dynamic by měla být  $4 \cdot D_B = 15,7\text{m}$ , nejlépe však alespoň  $6 \cdot D_B = 23,5\text{m}$ .

Vzhledem k tomu, že standardně bývá délka nosných šňůr padáku rovna cca 1 násobku konstrukčního průměru vrchlíku, což pro výše zmíněný vrchlík o ploše  $100\text{m}^2$  odpovídá délce nosných šňůr 11,3 m, musí být spojovací popruh vrchlíku dlouhý nejméně cca 4,4 m, nejlépe však alespoň 12,2 m.

Většina výrobců padákových záchranných soustav je nad hraniční mezí - spojovací popruh mívá délku kolem šesti metrů. Na tomto příkladu je ukázáno, že vrchlík padáku se stále nachází v silně rozrušeném proudu vzduchu, který má zásadní vliv na otevírací charakteristiky padáku a též na stabilitu pádu pod plně nafouknutým vrchlíkem.

Jelikož případná simulace rozrušeného proudu vzduchu za každým jednotlivým letadlem, u kterého je záchranná padáková soustava použita, by byla otázkou spíše pro výpočet pomocí CFD, je nutno pro další výpočet založený na Newtonově druhém zákoně efekt podvěšeného tělesa zanedbat.

### *Postup plnění vrchlíku padáku vzduchem*

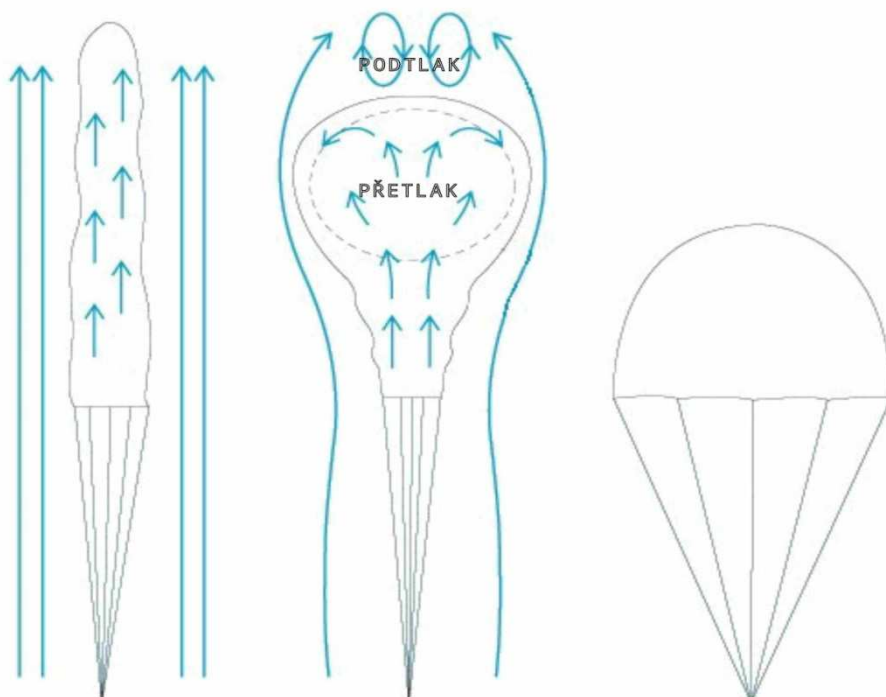
Po vytažení z kontejneru má vrchlík podlouhlý tvar, který je na dolním konci v místě napojení nosných šňůr vrchlíku otevřený. Tímto vstupním hrdlem proudí do vrchlíku vzduch, který se začíná akumulovat v místě jeho vrcholu a vytváří zde „bublinu“ o vyšší tlaku, která se vlivem dalšího přísunu vzduchu rychle zvětšuje. Tvar této rostoucí bubliny je dán aerodynamickými silami, které působí z vnějšku podél hranice definované látkou vrchlíku, a tím vytvářejí rozdíl mezi tlakem uvnitř vrchlíku a vně.

V této fázi má vrchlík tvar tupého tělesa, které při svém obtékání za sebou vytváří velký úplav s nižším tlakem, což dále napomáhá k růstu objemu vzduch zachycenému ve vrcholu vrchlíku a jeho horizontální rozpínání. Toto rapidní rozpínání je na druhé

straně v místě nabíhajícího proudu naopak bržděno při obtékání generovaným tlakem, který vrchlík z vnějšku stlačuje. Během tohoto procesu dochází ke krátkodobému průchodu soustavy stavem, kdy plnící se vrchlík zaujme ideální aerodynamický tvar z hlediska jeho čelního odporu.

Díky vnějším aerodynamickým silám nemá už vnitřní vzduch o zvětšujícím se tlaku možnost dalšího horizontálního rozvíjení a dochází k rychlému vertikálnímu postupu vzduchu od vrcholu k spodnímu konci vrchlíku. V okamžiku dosažení vstupního hrdla vrchlíku je hrdlo zevnitř rychle roztaženo a zbytek objemu vzduchu vrchlíku zaplněn. Tím dochází k největšímu nárůstu čelního odporu vrchlíku a zpomalení rychlosti pádu.

V následujícím okamžiku je vrchlík „přeplněn“ vzduchem o vyšším tlaku vzniklým jednak rozpínajícím se původní bublinou, jednak rychlým přeplněním vrchlíku při roztažení vstupního hrdla a též elasticitou vrchlíku. Tento vzduch expanduje a je následně z vrchlíku vypuzen, dochází k „medúzovitému“ pulzu, často i s možnou tvarovou deformací vrchlíku. Těchto pulzů může být několik, ale jsou rychle tlumeny a po nastolení tlakové rovnováhy přechází vrchlík do ustáleného stavu klesání.



Obr. 10.4 Proces plnění kruhového vrchlíku padáku bez slideru.

### 10.3.1 Výpočet plnicího času

Pro výpočet kruhového vrchlíku bez slideru pro padákovou záchrannou soustavu je použita Pflanz-Ludtke metoda [30], která je založena na Newtonově druhém zákoně. Pro zjednodušení je uvažováno, že se padák otevírá ve vodorovném směru.

Při procesu plnění vrchlíku padáku je hmota vzduchu, kterou vrchlík pojme rovna rozdílu hmoty vzduchu vstupujícího do vrchlíku hrdlem a hmoty prostupující skrz vrchlík vlivem propustnosti tkaniny, výřezů, klapků, atd. Rychlost vstupujícího vzduchu s plnicím se vrchlíkem klesá díky zpomalování soustavy a zvyšování tlaku uvnitř vrchlíku. Naopak vyšší tlak uvnitř vrchlíku zvyšuje objem vzduchu prostupujícího skrz tkaninu vrchlíku.

$$\rho \frac{d\Theta_g}{dt} = \rho V A_M - \rho P A_S \quad (10.3)$$

Kde  $\Theta_g$  je objem pojmutého vzduchu vrchlíkem,  $A_M$  je plocha vstupního hrdla,  $A_S$  je tlaková plocha vrchlíku, skrz kterou vzduch prostupuje,  $V$  je rychlost vstupujícího vzduchu a  $P$  je propustnost vrchlíku. Změnu hustoty vzduchu během otevírání padáku lze zanedbat.

Pro vyřešení rovnice (10.3) je nutné určit následující.

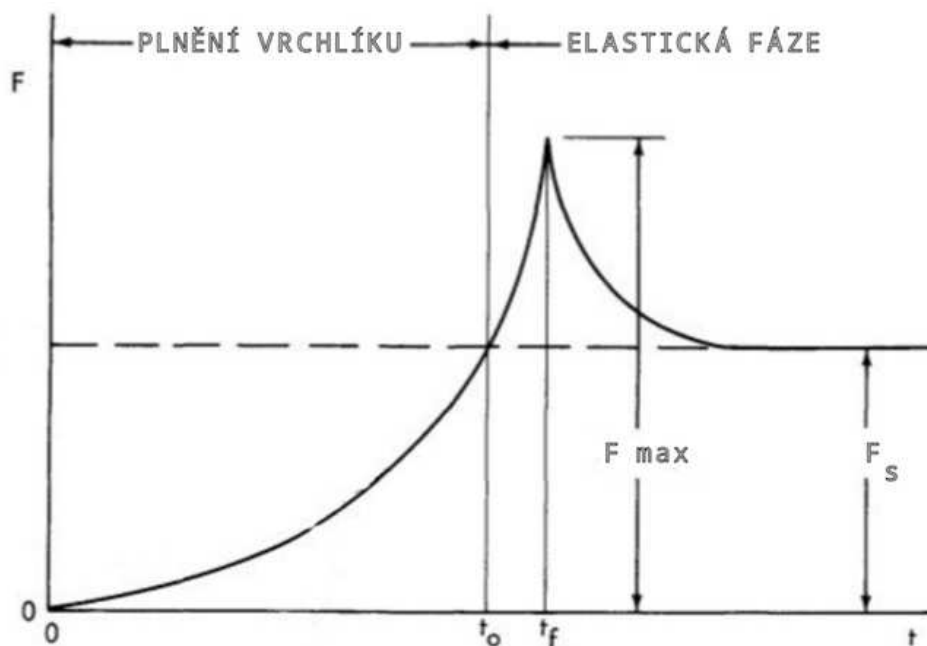
- Najít vyjádření změny plochy vstupního hrdla  $A_M$  a změny plochy vrchlíku, přes kterou vzduch prostupuje  $A_S$  v závislosti na čase.
- Určit objemu vzduchu, který vrchlík musí pojmout pro své plné nafouknutí  $\Theta_g$ .
- Určit propustnost vrchlíku  $P$ .

#### Vyjádření změny $A_M$ a $A_S$ v závislosti na čase.

Dle Ludtke [30] platí pro celolátkové vrchlíky:

$$\frac{A_M}{A_{M0}} = \frac{A_S}{A_{S0}} = \frac{C_D S}{C_D S_0}. \quad (10.4)$$



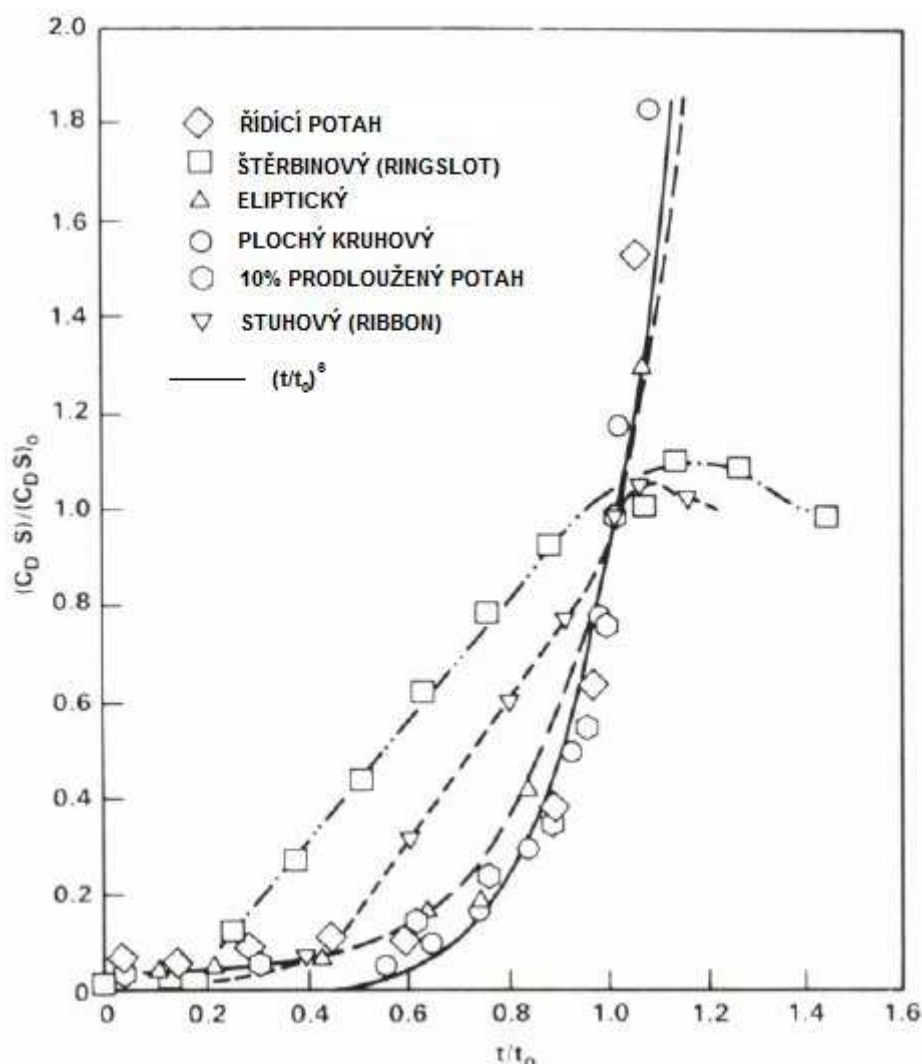


Obr. 10.5 Závislost otevírací síly na čase při obtékání nekonečným proudem.

Na Obr. 10.5 je zobrazen typický průběh otevírací síly v závislosti na čase při obtékání nekonečným proudem u kruhového, celolátkového vrchlíku. Maximální velikosti odporové plochy vrchlíku a tím i maximální otevírací síly je dosaženo v čase  $t_f$ . Jelikož čas plného nafouknutí vrchlíku  $t_f$  závisí na hmotnosti soustavy, strukturální pevnosti a elasticitě padáku, není vhodný pro výpočet. Pro výpočet se používá ekvivalentní čas  $t_0$ , což je čas plnění vrchlíku do okamžiku, kdy poprvé dosáhne odporové plochy, která odpovídá jeho odporové ploše v režimu ustáleného klesání. Nebo též dosáhne poprvé takové odporové síly, která odpovídá odporové síle v režimu ustáleného klesání.

Nejdůležitějším faktorem ve výpočtu padáku touto metodou je variabilní velikost odporové plochy otevírajícího se vrchlíku v čase. Pro celolátkové kruhové vrchlíky bylo mnoha testy ověřeno, že vhodnou aproximací rychlosti změny odporové plochy vrchlíku v čase, je mocninná funkce:

$$\frac{C_D S}{C_D S_0} = \left( \frac{t}{t_0} \right)^6. \quad (10.5)$$



Obr. 10.6 Změna odporové plochy plnicích se vrchlíků v závislosti na čase [30].

Vztah (10.5) platí pro zjednodušený případ, že v čase  $t = 0$  je počáteční odporová plocha vrchlíku  $C_D S = 0$ , který je ovšem v praxi nereálný. V okamžiku natažení nosných šňůr má již vrchlík určitou počáteční odporovou plochu  $C_D S > 0$ . Proto byl vztah (10.5) rozšířen podle [30]:

$$\frac{C_D S}{C_D S_0} = \left( (1 - \eta) \left( \frac{t}{t_0} \right)^3 + \eta \right)^2. \quad (10.6)$$

Kde  $\eta$  je součinitel velikosti plochy vstupního hrdla. Ten odpovídá poměru promítnutým ploch do roviny kolmé na směr vektoru nabíhajícího proudu vzduchu. A to plochy vstupního hrdla a plochy nafouknutého vrchlíku v režimu ustáleného klesání.

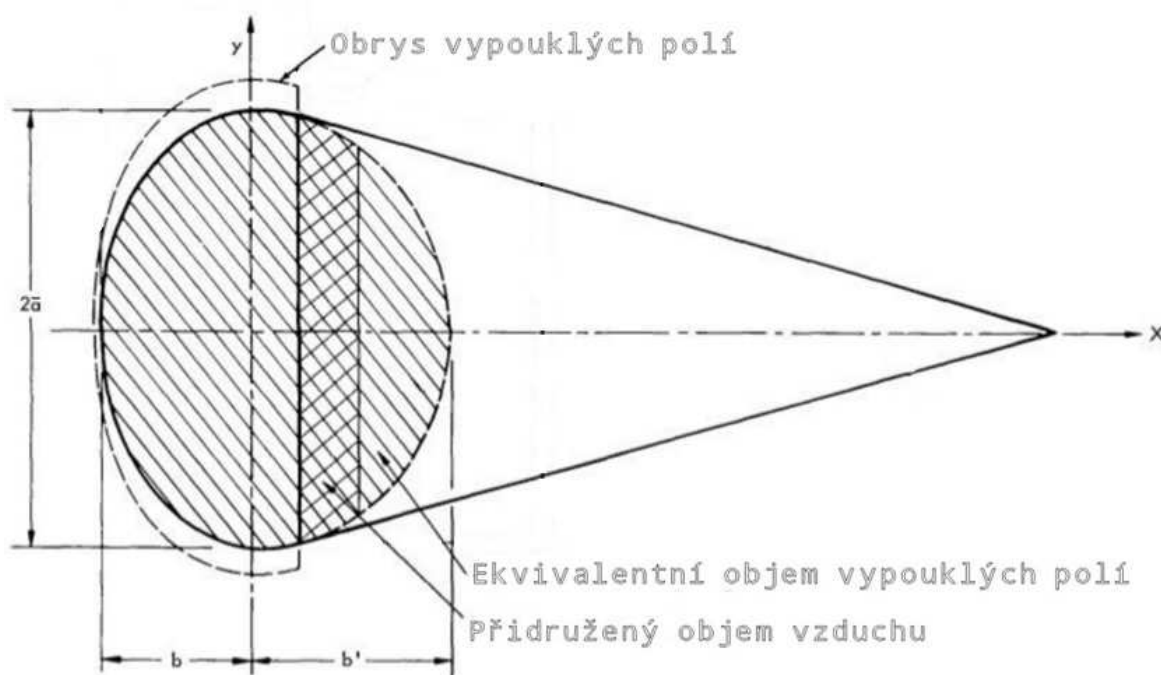
## Určení objemu vzduchu, který vrchlík musí pojmout pro své plné nafouknutí

Co nejpřesnější určení objemu vrchlíku a přidruženého objemu, který se musí během fáze plnění vrchlíku zaplnit vzduchem, hraje velikou roli ve výpočtu výsledného času otevření a tím i vzdálenosti otevření.

Při testech a tunelových měřeních bylo pozorováno, že celkový objem vzduchu je součtem objemu vrchlíku padáku včetně objemu vzduchu v jednotlivých vypouklých polích vrchlíku a přidruženého objemu vzduchu, který před sebou vrchlík při svém pohybu hromadí a "tlačí" coby konkávní těleso.

Studie [29] a [30] ukázaly, že pro různé profily vrchlíků - plochého kruhového, eliptického, půlkulovitého, atp. jsou vhodnou aproximací profilu vrchlíku dvě půlelipsy se společnou hlavní osou  $2\bar{a}$  a rozdílnými vedlejšími osami  $b$  a  $b'$  viz Obr. 10.7.

Výsledný elipsoid vzniklý otáčením profilu kolem osy vrchlíku potom udává celkový objem nutný k zaplnění vzduchem při otevírání vrchlíku padáku  $\Theta_g$ . Parametry vrchlíku pro výpočet jsou určeny měřením při shozových zkouškách.



Obr. 10.7 Určení celkového objemu vzduchu [29].

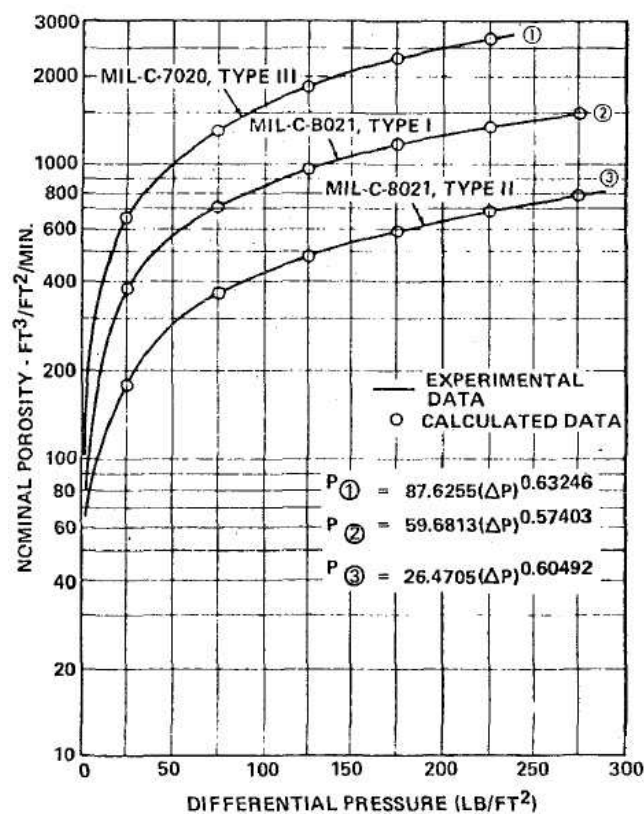
$$\Theta_g = \frac{2}{3} \cdot \pi \cdot \bar{a}^3 \cdot \left( \frac{b}{\bar{a}} + \frac{b'}{\bar{a}} \right) \quad (10.7)$$

## Určení propustnosti vrchlíku

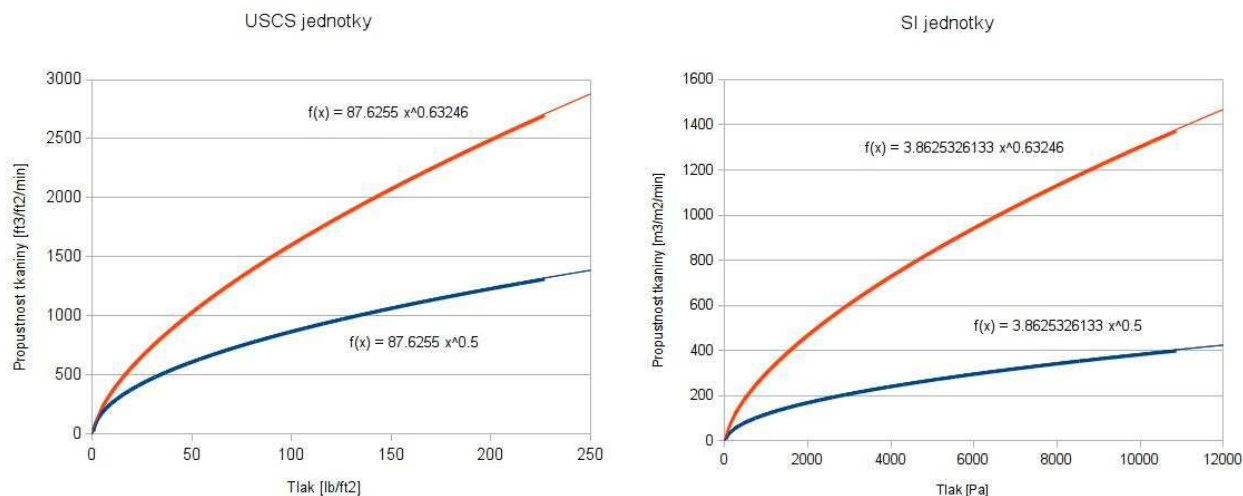
Objem vzduchu, který prostupuje tkaninou v tlakové oblasti nafukujícího se vrchlíku, je přímo úměrný velikosti plochy této oblasti a rozdílu tlaků v této oblasti. Změna velikosti tlakové oblasti vrchlíku je funkcí ekvivalentního času  $t_0$  a je úměrná okamžitému odporovému poměru.

Měřením propustnosti tkaniny v závislosti na rozdílu tlaků bylo zjištěno, že naměřené hodnoty se dají velice dobře proložit funkcí viz Obr. 10.8:

$$P = k(\Delta p)^{n_p}. \quad (10.8)$$



Obr. 10.8 Závislost propustnosti tkaniny na rozdílu tlaků [29].



Obr. 10.9 Závislost propustnosti tkaniny na rozdílu tlaků, přepočten z USCS do SI jednotek pro tkaninu MIL-C-7020, TYPE III.

Tlakový součinitel padáku je definován jako rozdíl tlaků uvnitř a vně tkaniny vrchlíku ku dynamickému tlaku nerozrušeného proudu vzduchu:

$$c_p = \frac{\Delta p}{q} = \frac{\Delta p}{\frac{1}{2} \rho V^2}. \quad (10.9)$$

Tlakový součinitel padáku se během otevírání vrchlíku považuje za konstantní a pro celolátkové padáky se doporučuje jeho velikost volit  $c_p = 1,7$  [30].

Propustnost tkaniny lze potom vyjádřit jako:

$$P = k \left( \frac{1}{2} \rho V^2 c_p \right)^{n_p}. \quad (10.10)$$

Z tohoto výrazu je zřejmé, že se stoupající výškou (klesající hustotou vzduchu) klesá též propustnost tkaniny a tím tedy roste rychlost otevírání celolátkových vrchlíků.

**Dosazení do základní rovnice:**

Rovnice (10.3) po dosazení předchozích bodů:

$$\rho \frac{d\theta_g}{dt} = \rho V A_{M0} \left( (1 - \eta) \left( \frac{t}{t_0} \right)^3 + \eta \right)^2 - \rho k \left( \frac{1}{2} \rho c_p \right)^{n_p} V^{2n_p} A_{S0} \left( (1 - \eta) \left( \frac{t}{t_0} \right)^3 + \eta \right)^2. \quad (10.11)$$

V této rovnici zbývá vhodně vyjádřit okamžitou rychlost  $V$  jako funkci známé rychlosti v čase  $T_s$ , což je rychlost  $V_s$ . Pro padákové záchranné je tato rychlost  $V_s = IAS_{\text{letadla}}$ . Newtonův druhý pohybový zákon:

$$\sum F = \frac{d(mV)}{dt}. \quad (10.12)$$

Dosazením aerodynamického odporu a hmotnosti soustavy ve vodorovném směru [30]:

$$-\frac{1}{2} \rho V^2 C_D S = \frac{W}{g} \frac{dV}{dt}. \quad (10.13)$$

Po úpravě:

$$\int_0^t C_D S dt = \frac{-2W}{\rho g} \int_{V_s}^V \frac{1}{V^2} dV. \quad (10.14)$$

Vynásobením pravé strany vztahem  $\frac{V_s t_0 C_D S_0}{V_s t_0 C_D S_0}$ :

$$\int_0^t C_D S dt = \frac{-2W}{\rho g} \int_{V_s}^V \frac{1}{V^2} dV \frac{V_s t_0 C_D S_0}{V_s t_0 C_D S_0}.$$

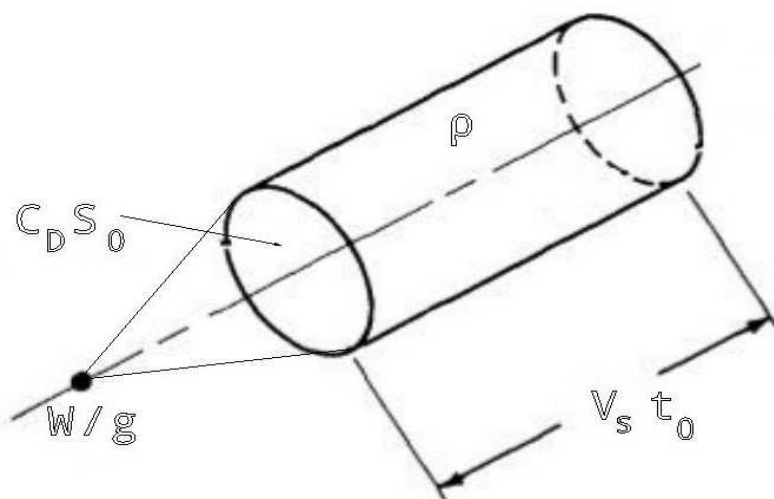
Vydělením obou stran rovnice  $t_0$  a  $C_D S_0$ :

$$\frac{1}{t_0} \int_0^t \frac{C_D S}{C_D S_0} dt = \frac{-2W}{\rho g V_s t_0 C_D S_0} V_s \int_{V_s}^V \frac{1}{V^2} dV. \quad (10.15)$$

Pravá strana této rovnice obsahuje vztah:

$$\frac{2W}{\rho g V_s t_0 C_D S_0} = M. \quad (10.16)$$

Tento výraz se nazývá balistický hmotnostní poměr BMR.



Obr. 10.10 Vizualizace balistického hmotnostního poměru BMR.

Je poměrem dvojnásobku celkové hmotnosti soustavy ku hmotnosti vzduchu v objemu kruhového válce, který je vytvořen pohybujícím se vrchlíkem o odporové ploše  $C_D S_0$  po dráze  $V_s t_0$  v atmosféře o hustotě  $\rho$ .

Dosazením výrazu (10.16) do (10.15), získáme:

$$\int_{V_s}^V \frac{1}{V^2} dV = \frac{\frac{1}{t_0} \int_0^t \frac{C_D S}{C_D S_0} dt}{-M V_s}. \quad (10.17)$$

Po integraci je možné vyjádřit okamžitou rychlost a dosadit ji do rovnice (10.3) pro výpočet otevíracího času  $t_0$ .

Ludtke [30] používá pro explicitní vyjádření času otevření  $t_0$  zjednodušení spočívající v položení  $\eta = 0$  a  $n_p = 0,5$ .

Rovnice (10.11) poté:

$$\rho \frac{d\Theta_g}{dt} = \rho V A_{M0} \left( \frac{t}{t_0} \right)^6 - \rho k \left( \frac{1}{2} \rho c_p \right)^{\frac{1}{2}} V A_{S0} \left( \frac{t}{t_0} \right)^6. \quad (10.18)$$

Rovnice (10.17) poté:

$$\int_{V_s}^V \frac{1}{V^2} dV = \frac{\frac{1}{t_0} \int_0^t \left( \frac{t}{t_0} \right)^6 dt}{-M V_s}. \quad (10.19)$$

Odvození času otevření pro toto zjednodušení viz Příloha 6.

$$t_0 = \frac{14W}{\rho g V_s C_D S_0} \cdot \left( e^{\frac{g \rho \Theta_g C_D S_0}{2W A_{M0} - W k A_{S0} \sqrt{2 \rho c_p}}} - 1 \right). \quad (10.20)$$

### Výpočet času otevření pro $\eta \neq 0$

Není uvažováno, že v okamžiku začátku plnění vrchlíku padáku vzduchem má jeho vstupní hrdlo nulovou velikost ( $\eta = 0$ ).

Rovnice (10.11) poté:

$$\rho \frac{d\Theta_g}{dt} = \rho V A_{M0} \left( (1 - \eta) \left( \frac{t}{t_0} \right)^3 + \eta \right)^2 - \rho k \left( \frac{1}{2} \rho c_p \right)^{n_p} V A_{S0} \left( (1 - \eta) \left( \frac{t}{t_0} \right)^3 + \eta \right)^2. \quad (10.21)$$

Rovnice (10.17) poté:

$$\int_{V_s}^V \frac{1}{V^2} dV = \frac{\frac{1}{t_0} \int_0^t \left( (1 - \eta) \left( \frac{t}{t_0} \right)^3 + \eta \right)^2 dt}{-M V_s}. \quad (10.22)$$

Odvození viz Příloha 7. Explicitní vyjádření času otevření není možné, je nutné numerické řešení  $t_0$  z rovnice:



$$\Theta_g = - \left( M t_0 V_s \left( A_{M0} - \frac{\sqrt{2} k A_{S0} \sqrt{\rho c_p}}{2} \right) \left( \ln \left( \frac{M t_0^7}{2 \eta^2 - 4 \eta + 2} \right) - \ln \left( \frac{t_0^7}{28 \eta^2 - 56 \eta + 28} (9 \eta^2 + 3 \eta + 14 M + 2) \right) \right) \right). \quad (10.23)$$

### Výpočet času otevření pro $\eta \neq 0$ a $n_p \neq 0,5$

Není uvažováno, že v okamžiku začátku plnění vrchlíku padáku vzduchem má jeho vstupní hrdlo nulovou velikost a exponent propustnosti není roven 0,5. Exponent propustnosti byl zvolen roven 0,5 dle [30] kvůli zjednodušení – rychlost  $V$  v rovnici (10.10) je poté pouze v první mocnině. Toto zjednodušení má dosti výrazný vliv na průběh propustnosti tkaniny v porovnání s experimentálními hodnotami, kde je naměřené  $n_p = 0,63246$ , viz Obr. 10.9.

Rovnice (10.11) je poté nezjednodušená:

$$\rho \frac{d\Theta_g}{dt} = \rho V A_{M0} \left( (1 - \eta) \left( \frac{t}{t_0} \right)^3 + \eta \right)^2 - \rho k \left( \frac{1}{2} \rho c_p \right)^{n_p} V^{2n_p} A_{S0} \left( (1 - \eta) \left( \frac{t}{t_0} \right)^3 + \eta \right)^2. \quad (10.24)$$

Vyjádření rychlosti je stejné jako (10.22):

$$\int_{V_s}^V \frac{1}{V^2} dV = \frac{\frac{1}{t_0} \int_0^t \left( (1 - \eta) \left( \frac{t}{t_0} \right)^3 + \eta \right)^2 dt}{-M V_s}.$$

Díky složitosti vztahů není možný přímý výpočet  $t_0$  (odvození viz Příloha č.8). Je nutné použít iterační způsob řešení, a to porovnáváním objemů pojmutého vzduchu vrchlíkem. Toto porovnávání je řešeno programem. Tento program pro zadané  $t_0$  vypočítá odpovídající objem pojmutého vzduchu vrchlíkem  $\Theta_c$ , který je porovnán se známým objemem pojmutého vzduchu  $\Theta_g$ , vypočítaného z geometrických charakteristik vrchlíku. Pokud není s požadovanou přesností rovno  $\Theta_g = \Theta_c$ , přepočítá se  $t_0$  a výpočet se opakuje pro nové  $t_0$ .

### 10.3.2 Výpočet maximální otevírací síly

Dle [30] je definován součinitel dynamického rázu jako poměr mezi okamžitou odporovou silou  $F$  a silou při ustáleném klesání padáku  $F_s$  rychlostí  $V_s$ , která je rychlostí v počátku plnění vrchlíku padáku vzduchem. Následující vztahy platí pro

zjednodušený případ  $\eta = 0$  a  $n_p = 0,5$ :

$$x_i = \frac{F}{F_s} = \frac{\frac{1}{2}\rho V^2 C_D S}{\frac{1}{2}\rho V_s^2 C_D S_0}, \quad (10.25)$$

potom při zanedbání změny hustoty vzduchu během otevírání:

$$x_i = \frac{C_D S}{C_D S_0} \left( \frac{V}{V_s} \right)^2. \quad (10.26)$$

S použitím vztahu (10.5) pro  $\eta = 0$ :

$$\frac{C_D S}{C_D S_0} = \left( \frac{t}{t_0} \right)^6.$$

Poměr  $\frac{V}{V_s}$  lze vyjádřit z (10.19), integrace viz Příloha č. 6:

$$\frac{V}{V_s} = \frac{1}{1 + \frac{1}{7M} \left( \frac{t}{t_0} \right)^7} = \frac{7Mt_0^7}{t^7 + 7Mt_0^7}, \quad (10.27)$$

a dosazením do rovnice (10.26):

$$x_i = \frac{C_D S}{C_D S_0} \left( \frac{V}{V_s} \right)^2 = \left( \frac{t}{t_0} \right)^6 \left( \frac{7Mt_0^7}{t^7 + 7Mt_0^7} \right)^2.$$

Po úpravě je poté průběh součinitele dynamického rázu dán funkcí:

$$x_i(t) = \frac{49M^2 t^6 t_0^8}{(t^7 + 7Mt_0^7)^2}. \quad (10.28)$$

Položením první derivace rovna nule se poté (mimo jiných bodů) určí extrém průběhu součinitele dynamického rázu v čase, tzn. okamžik kdy v průběhu otevírání padáku bude působit největší odporová síla:

$$-\frac{98M^2 t^5 t_0^8 (4t^7 - 21Mt_0^7)}{(t^7 + 7Mt_0^7)^3} = 0.$$

V tomto vztahu může být roven nule pouze výraz  $(4t^7 - 21Mt_0^7) = 0$ , ze kterého lze vyjádřit okamžik, při kterém bude působit největší otevírací síla:

$$t_{x_{imax}} = \left(\frac{21}{4}M\right)^{\frac{1}{7}} t_0. \quad (10.29)$$

Dosazením  $t_{x_{imax}}$  zpět do (10.28) získáme vyjádření pro maximální součinitel dynamického rázu:

$$x_{imax} = \frac{49M^2 t_{x_{imax}}^6 t_0^8}{(t_{x_{imax}}^7 + 7Mt_0^7)^2} = \frac{16}{49} \left(\frac{21}{4}M\right)^{\frac{6}{7}}. \quad (10.30)$$

Maximální otevírací síla:

$$F_{max} = x_{imax} \cdot F_s. \quad (10.31)$$

Výše uvedené vztahy platí pro zjednodušený případ  $\eta = 0$  a  $n_p = 0,5$ . Výpočet maximální otevírací síly pro případ  $\eta \neq 0$  vede na daleko komplikovanější vztahy, které je nutné řešit numericky. Odvození těchto vztahů viz Příloha č. 9, průběh součinitele dynamického rázu pro  $\eta \neq 0$  je dán funkcí:

$$x_i(t) = \frac{196M^2 t_0^{14} \left(\eta - \frac{t^3(\eta - 1)}{t_0^3}\right)^2}{(2t^7\eta^2 - 4t^7\eta + 2t^7 - 7t^4\eta^2 t_0^3 + 7t^4\eta t_0^3 + 14t\eta^2 t_0^6 + 14Mt_0^7)^2}. \quad (10.32)$$

### 10.3.3 Výpočet pro obecnou trajektorii

Výše uvedené vztahy pro výpočet času otevření a maximální otevírací síly jsou uvedeny pro vodorovný směr otevírání padáku – je zde zanedbán vliv tíhového zrychlení. Tento vliv lze zanedbat v případě vysoké počáteční rychlosti plnění vrchlíku.

V okamžiku, kdy bude nutné provést výpočet otevření padáku pro nízkou počáteční rychlost, nebude tato metoda dávat použitelné výsledky. Důvodem je právě tíhové zrychlení, které pohyb (pád) soustavy zpočátku otevírání padáku zrychluje. Padák se tedy ve skutečnosti otevře mnohem rychleji, než odpovídá výpočtu ve vodorovném směru (bez vlivu tíhového zrychlení).

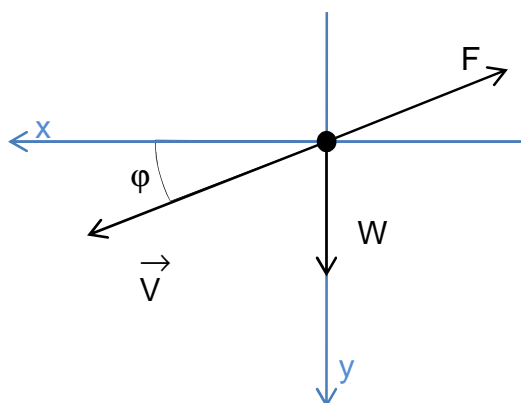
Výpočet pro nulovou počáteční rychlost  $V_s$  není výše uvedenou metodou možný, což vyplývá z podmínek integrování, nebo definice balistického hmotnostního poměru  $M$  (10.16) (dělení nulou).

Silová rovnováha ve směru x:

$$-\frac{1}{2}\rho V^2 C_D S \cos \varphi = \frac{W}{g} \frac{dV_x}{dt}.$$

Silová rovnováha ve směru y:

$$W - \frac{1}{2}\rho V^2 C_D S \sin \varphi = \frac{W}{g} \frac{dV_y}{dt}.$$



Obr. 10.11 Silová rovnováha.

Vyjádření přírůstků rychlostí:

$$dV_x = -\frac{g\rho V^2 C_D S \cos \varphi}{2W} dt, \quad (10.33)$$

$$dV_y = \left( g - \frac{g\rho V^2 C_D S \sin \varphi}{2W} \right) dt. \quad (10.34)$$

Použitím vztahů (10.16):

$$M = \frac{2W}{\rho g V_s t_0 C_D S_0}$$

a (10.6)

$$\frac{C_D S}{C_D S_0} = \left( (1 - \eta) \left( \frac{t}{t_0} \right)^3 + \eta \right)^2.$$

Dosazením do vyjádření přírůstků rychlostí (10.33) a (10.34) a úpravou:

$$dV_x = -\frac{V^2 \cos \varphi \left( (1 - \eta) \left( \frac{t}{t_0} \right)^3 + \eta \right)^2}{M V_s t_0} dt, \quad (10.35)$$

$$dV_y = \left( g - \frac{V^2 \sin \varphi \left( (1 - \eta) \left( \frac{t}{t_0} \right)^3 + \eta \right)^2}{M V_s t_0} \right) dt. \quad (10.36)$$

Složky rychlosti:

$$V_x(t) = V_s \cos \varphi + dV_x ,$$

$$V_y(t) = V_s \sin \varphi + dV_y .$$

Celková rychlost:

$$V(t) = \sqrt{V_x^2 + V_y^2} . \quad (10.37)$$

Úhel trajektorie pádu:

$$\tan \varphi(t) = \frac{V_y}{V_x} . \quad (10.38)$$

Součinitel dynamického rázu dle (10.26):

$$x_i(t) = \frac{C_D S}{C_D S_0} \left( \frac{V}{V_s} \right)^2 = \left( (1 - \eta) \left( \frac{t}{t_0} \right)^3 + \eta \right)^2 \left( \frac{V}{V_s} \right)^2 = \frac{V^2 (\eta t_0^3 - t^3 \eta + t^3)^2}{t_0^6 V_s^2} . \quad (10.39)$$

Velikost otevírací síly:

$$F(t) = x_i(t) \cdot F_s . \quad (10.40)$$

Uražená vzdálenost během otevírání:

$$s(t) = \frac{V dV}{g - \frac{V^2 \left( (1 - \eta) \left( \frac{t}{t_0} \right)^3 + \eta \right)^2}{M V_s t_0}} = \frac{V dV}{g - \frac{V^2 (\eta t_0^3 - t^3 \eta + t^3)^2}{M V_s t_0^7}} . \quad (10.41)$$

Objem pojmutého vzduchu (10.11) se zanedbáním změny hustoty vzduchu během otevírání:

$$\Theta_c(t) = A_{M0} V \left( (1 - \eta) \left( \frac{t}{t_0} \right)^3 + \eta \right)^2 - A_{S0} k \left( \frac{1}{2} \rho c_p \right)^{n_p} V^{2n_p} \left( (1 - \eta) \left( \frac{t}{t_0} \right)^3 + \eta \right)^2 . \quad (10.42)$$

Pro výpočet času otevření  $t_0$  byl sestaven program v software Mathcad viz Příloha 10, který pro počáteční  $t_0$  vypočítává objem pojmutého vzduchu  $\Theta_c$ . Ten je následně porovnán s objemem pojmutého vzduchu zjištěného z geometrických charakteristik vrchlíku  $\Theta_g$ . Pokud si objemy nejsou s požadovanou přesností rovny, je přepočítáno  $t_0$  a dochází k novému výpočtu. Výsledkem výpočtu je poté  $t_0$  při kterém je s požadovanou přesností  $\Theta_c = \Theta_g$ .

## **10.4 Fáze stabilizace**

Fází stabilizace se rozumí doba od prvotního dosažení odporové plochy vrchlíku, která je rovna odporové ploše vrchlíku v režimu ustáleného klesání do okamžiku, kdy dojde k ustálení klesací rychlosti otevřeného vrchlíku.

Během této fáze celá soustava zpomaluje. Roli zde hraje elasticita vrchlíku a nosných šňůr. V případě poddajného vrchlíku dochází k jeho přeplnění a zvětšení jeho odporové plochy nad mez, která by odpovídala velikosti odporové plochy v režimu ustáleného klesání. Vlivem tohoto přeplnění a elasticity může dojít k „medúzovitým“ pulzům vrchlíku.

K určení doby stabilizace, respektive okamžiku, kdy dosáhne soustava ustálené rychlosti klesání, se využívají výhradně shozové zkoušky s instalovaným akcelerometrem nebo výškoměrem. Z vynesných průběhů v čase pak lze zjistit okamžik začátku ustálené fáze klesání, který značí začátek konstantní hodnoty zrychlení v čase (v případě použití akcelerometru) nebo začátek lineárního průběhu změny výšky v čase (v případě použití výškoměru).

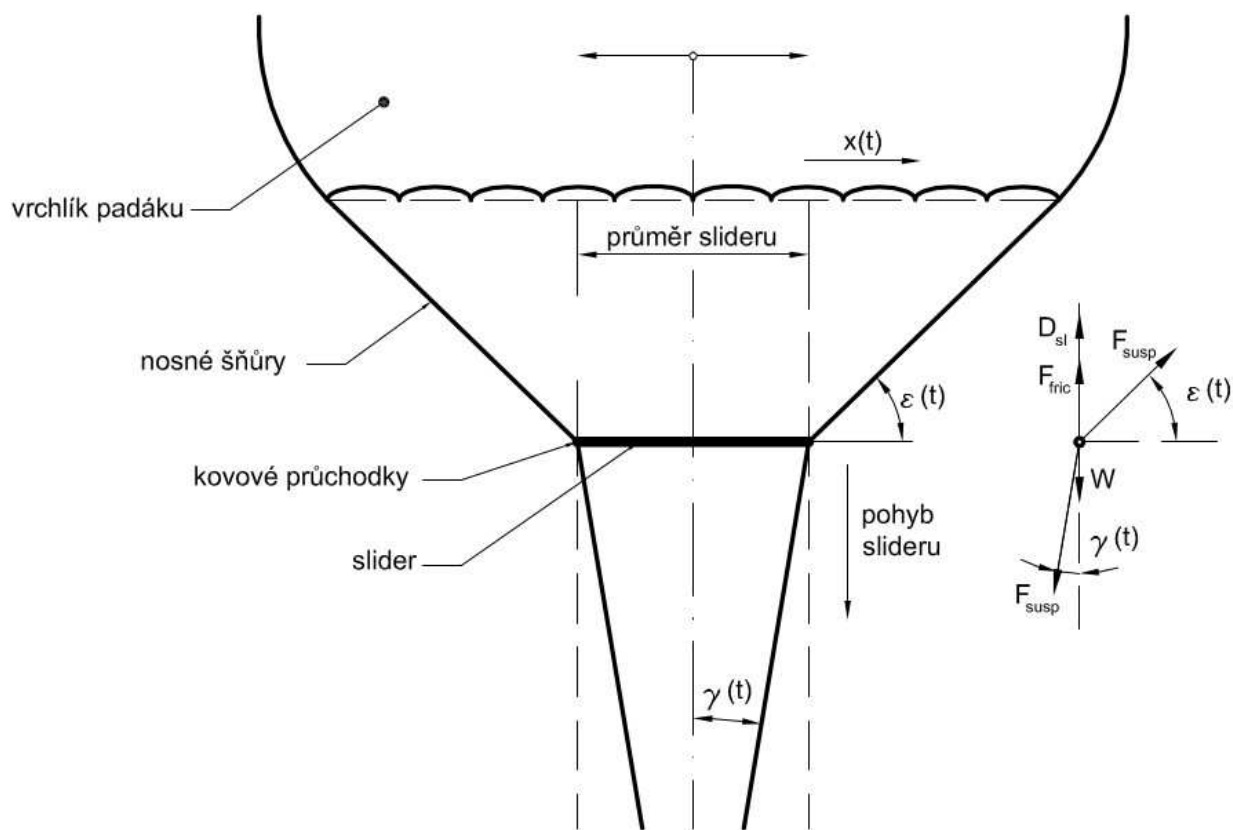
## **10.5 Fáze ustáleného klesání**

Tato fáze je závěrečnou fází letu pod plně nafouknutým a stabilizovaným padákem zakončená přistáním. Ze statistiky (viz Kapitola 4) ovšem vyplývá, že v mnoha případech tato fáze vůbec neproběhne, protože je záchranná soustava aktivována v příliš nízké výšce, aby se mohl padák vůbec plně stabilizovat, natož přejít do ustáleného režimu klesání.

## **10.6 Výpočet vrchlíku padáku se sliderem**

V oblasti kruhových padáku vybavených sliderem nebyl nikdy proveden systematictější výzkum s větším objemem shozových zkoušek, podle kterých by se mohla matematicky vyjádřit funkční závislost změny odporové plochy na čase. Většího pokroku ve výpočtovém modelu je dosaženo v oblasti klouzavých padáků se sliderem např. [32], které mají větší komerční využití.

Byly provedeny studie pro konkrétní případ kruhového vrchlíku se sliderem, kdy bylo dosaženo ve výpočtu dobré shody metodou vytvoření semiempirické závislosti z pozorovaných pokusů, např. [31]. Tato metoda ale například ve výpočtu nezahrnuje tření mezi nosnými šňůrami a kovovými průchodkami, které rychlost otevření ovlivňuje.



Obr. 10.12 Silové působení na slider padáku během plnění vrchlíku padáku.

V případě vrchlíku vybaveného sliderem budou v silovém působení u jedné průchodky vystupovat následující síly viz Obr. 10.12:

Síla v nosných šňůrách od roztahujícího se vrchlíku ve vertikálním směru:

$$F_{susp\,v} = \frac{1}{2} \rho V^2 C_D S \cos \gamma - \frac{1}{2} \rho V^2 C_D S \sin \varepsilon, \quad kde \quad \gamma, \varepsilon = f(x(t)). \quad (10.43)$$

Síla v nosných šňůrách od roztahujícího se vrchlíku v horizontálním směru:

$$F_{susp\,h} = \frac{1}{2} \rho V^2 C_D S \cos \varepsilon - \frac{1}{2} \rho V^2 C_D S \sin \gamma, \quad kde \quad \gamma, \varepsilon = f(x(t)). \quad (10.44)$$

Tíhová síla slideru:

$$W_{sl} = m_{sl} g. \quad (10.45)$$

Odporová síla slideru:

$$D_{sl} = \frac{1}{2} \rho V^2 C_{Dsl} S_{sl}. \quad (10.46)$$

Třecí síla mezi nosnými šňůrami a kovovými průchodkami slideru:

$$F_{fric} = \mu F_{susp} . \quad (10.47)$$

Potom síla působící na slider vertikálním směrem  $F_{slv}$  :

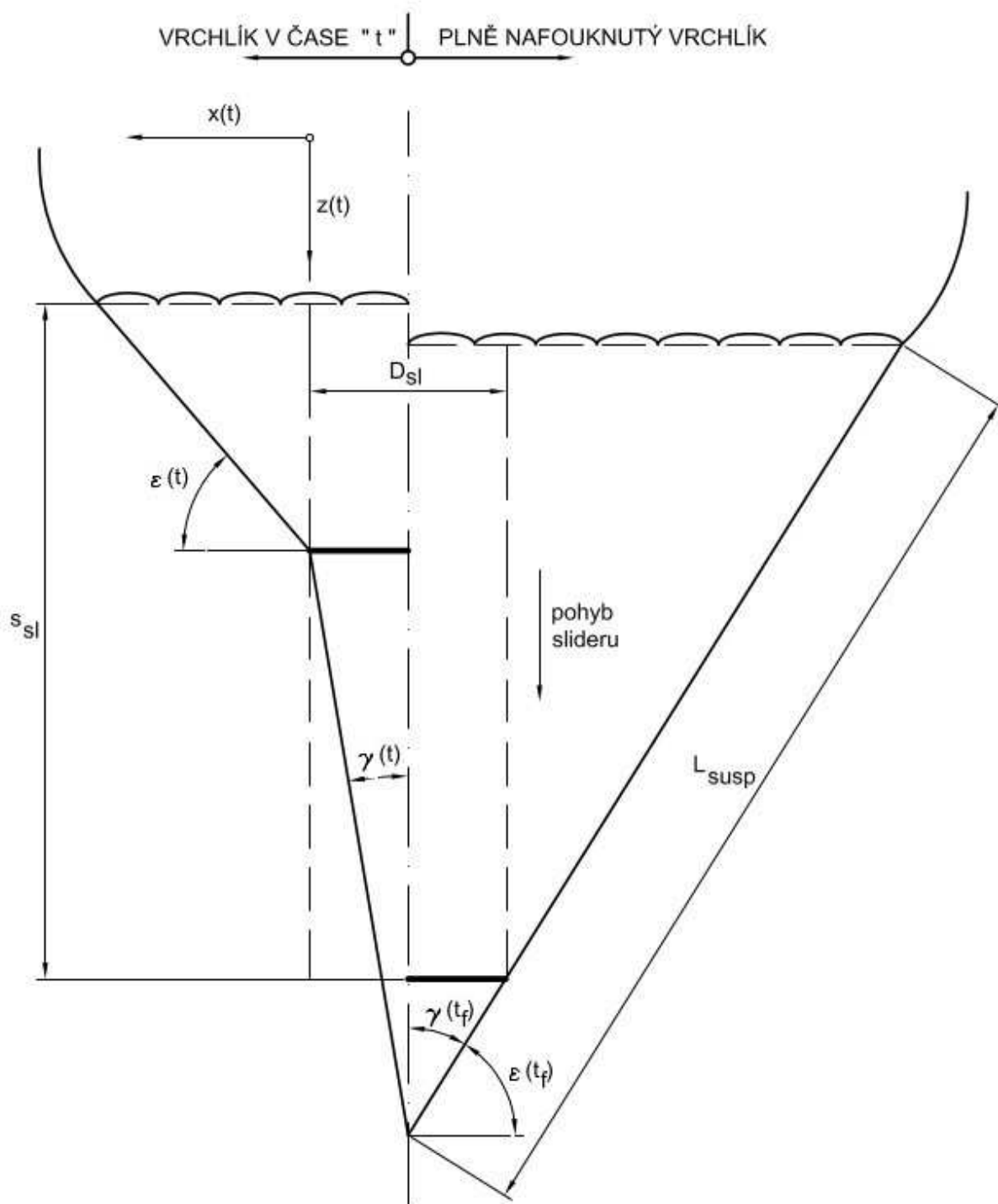
$$F_{slv} = F_{susp} + W - F_{fric} - D_{sl} . \quad (10.48)$$

Výše uvedené vztahy jsou uvedeny pro jednu průchodku slideru, celkový slider je kruhový a symetrický. Silové působení v horizontálním směru se vzájemně vyruší.

Slider se začne pohybovat směrem dolů, v okamžiku kdy bude odpor slideru  $D_{sl}$  menší, než součet tíhové síly slideru  $W_{sl}$  , síly v nosných šňůrách ve vertikálním směru  $F_{susp}$  a třecí síly  $F_{fric}$  :

$$D_{sl} < W_{sl} + F_{susp} - F_{fric} . \quad (10.49)$$





Obr. 10.13 Geometrie pohybu padákového slideru.

## 10.7 Pohybová rovnice padákového slideru

$$F_{sl} = m_{sl} \frac{d^2 z(t)}{dt^2} \quad (10.50)$$

Kde  $z(t)$  je okamžitá poloha slideru na nosných šňůrách, kterou lze vyjádřit v závislosti na  $x(t)$  :

$$z(t) = L_{susp} - \frac{D_{sl}}{2 \tan \gamma} . \quad (10.51)$$

Kde

$$\tan \gamma(t) = \frac{x(t)}{\sqrt{L_{susp}^2 - x(t)^2}} . \quad (10.52)$$

Potom  $z = f[x(t)]$ :

$$z[x(t)] = L_{susp} - \frac{1}{2} \frac{D_{sl}}{\frac{x(t)}{\sqrt{L_{susp}^2 - x(t)^2}}} = L_{susp} - \frac{D_{sl} \sqrt{L_{susp}^2 - x(t)^2}}{2x(t)} . \quad (10.53)$$

Nyní je pravá strana rovnice (10.53) funkcí změny odporové plochy vrchlíku v čase  $\frac{c_{DS}}{c_{DS_0}}(t)$ , reprezentovaná změnou velikosti  $x(t)$ , která pro celolátkové kruhové padáky může nabývat hodnot:

$$x(t) = (0; D_{inf}) \text{ respektive } \left(0; \frac{1}{3} D_0\right) .$$

Dle kapitoly 10.3.1 je pro celolátkové kruhové vrchlíky bez padákového slideru vhodnou aproximací změny odporové plochy exponenciální funkce  $\frac{c_{DS}}{c_{DS_0}} = \left(\frac{t}{t_0}\right)^6$ .

U kruhových vrchlíků vybavených sliderem je určení této obecné závislosti nemožné, právě kvůli padákovému slideru který vnáší velké množství proměnných, zásadně ovlivňujících otevírání. Problémem je vyjádření změny odporové plochy vrchlíku v čase  $\frac{c_{DS}}{c_{DS_0}}(t)$  a tím určení  $x(t)$ , v souvislosti s polohou slideru na nosných šňůrách  $z(t)$ . Pro výpočet by bylo nutné znát součinitel aerodynamického odporu

slideru, který lze zjistit nejlépe tunelovým měřením reálného provedení a součinitel tření mezi nosnými šňůrami a kovovými průchodkami padákového slideru.

S přihlédnutím k obtékanému průměru pro celolátkové ploché vrchlíky:

$$D_{inf} = \frac{2}{3} D_0 .$$

bude celková dráha, kterou musí padákový slider během otevírání padáku po šňůrách urazit - tzn. pro  $x(t) = \frac{1}{3} D_0$  rovna:

$$s_{sl} = L_{susp} - \frac{2}{3} \frac{D_{sl}}{\sqrt{L_{susp}^2 - \left(\frac{1}{3} D_0\right)^2}} = L_{susp} - \frac{D_{sl} \sqrt{9L_{susp}^2 - D_0^2}}{2x(t)} . \quad (10.54)$$

Se zvětšující se plochou vrchlíku a pohybem slideru směrem dolů, klesá úhel  $\varepsilon(t)$  a roste úhel  $\gamma(t)$ . Pohyb slideru je ukončen v okamžiku rovnosti:

$$\varepsilon(t_f) = 90^\circ - \gamma(t_f) .$$

Použití kruhových padáků se sliderem je takřka výsadní doménou padákových záchranných soustav pro letadla a smysluplný výpočet, bez sady shozových zkoušek je v tomto případě z důvodů vysoké variability účastníků se proměnných velice problematický. Hlavní metodou pro návrh stále zůstává řešerše a shozové zkoušky reálného padáku.

## 11 Vlekací zkoušky modelů

Účelem těchto orientačních vlekacích zkoušek bylo zjistit, zda se úprava vrchlíku pozitivně projeví na jeho stabilitě při stahování středové šňůry. Pro koncepční ověření konstrukce vrchlíku padáku byl ušit plochý, celolátkový, kruhový vrchlík o průměru 1,5 m viz Příloha č.1, který byl podroben vlekacím zkouškám. Následně byl tento vrchlík přešit do podoby podle Obr. 9.1 a viz Příloha č.1 a proměřen za stejných podmínek. Měření proběhlo v podvečerních hodinách vlekáním za automobilem na cca kilometrovém rovném úseku v areálu prostějovských kasáren.

### 11.1 Měřicí zařízení

Improvizovaným měřicím zařízením byl elektronický siloměr viz Obr. 11.1, ke kterému byl připevněn vlečený padák. Siloměr byl ukotven na tyči, která byla vyvedena do vzdálenosti 2 metrů do boku automobilu, kvůli snížení vlivu úplavu za vozidlem.



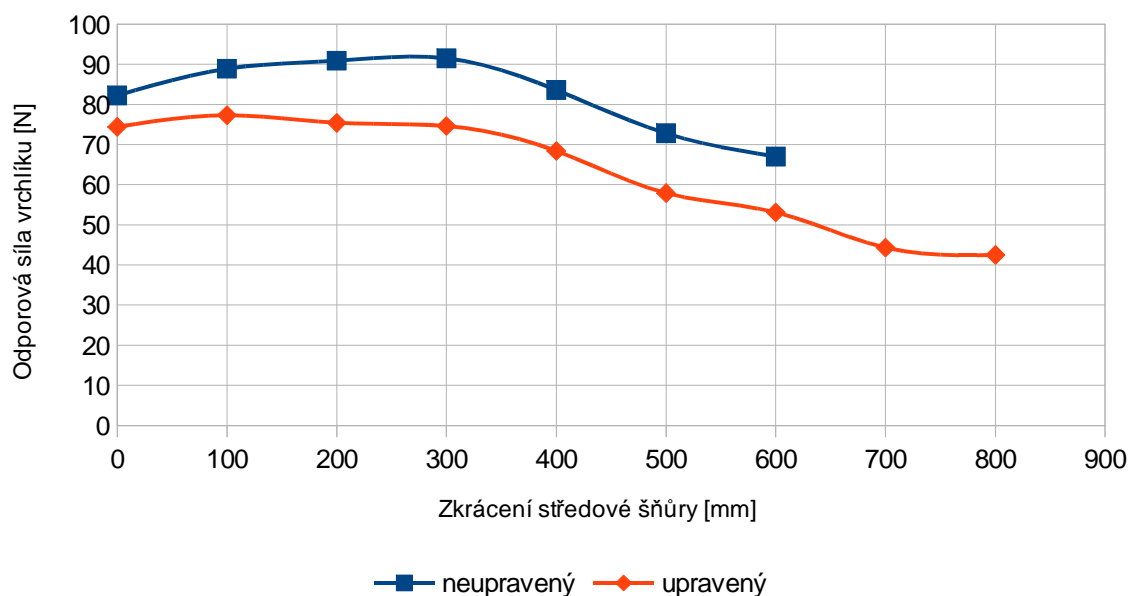
Obr. 11.1 Připojení padáku k improvizovanému siloměru.

### 11.2 Vlastní měření

Řidič rozjel vozidlo na tachometrovou rychlost  $40 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ , po ustálení rychlosti byla pozorovatelem na zadním sedadle vozidla zapsána hodnota zobrazená siloměrem. Stejné měření bylo provedeno v opačném směru jízdy kvůli eliminaci vlivu větru. Výsledkem jednoho měření pro danou konfiguraci vrchlíku byl poté aritmetický průměr dvou naměřených hodnot. Následně byla zkrácena středová šňůra o 100mm a dvojice měření se opakovala. Takto byly proměřeny oba vrchlíky.

### 11.3 Vyhodnocení měření

Vyhodnocením měření je následující graf vytvořený z naměřených hodnot:



Obr. 11.2 Graf závislosti odporové síly jednotlivých vrchlíků na zkrácení středové šňůry při rychlosti  $40 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ .

### 11.4 Závěr měření

Toto měření bylo pojato velice orientačně, ať už díky použité metodě vlečení automobilem, tak použitým měřicím zařízením. Nicméně rozborem grafu na Obr. 11.2 lze konstatovat, že úprava vrchlíku dovolila o cca 200 mm větší zkrácení středové šňůry, než došlo k příliš nestabilnímu chování padáku. Bylo tedy prokázáno, že se konstrukční úprava vrchlíku pozitivně projevila na jeho stabilitě při stahování středové šňůry.

I přes provedenou úpravu vrchlíku, padák při maximálním stažení středové šňůry již nebyl příliš stabilní. Proto na základě předchozí rešeršní práce a těchto zkoušek byla varianta řízení otevírání pomocí středové šňůry pro padákové záchranné soustavy zamítnuta.

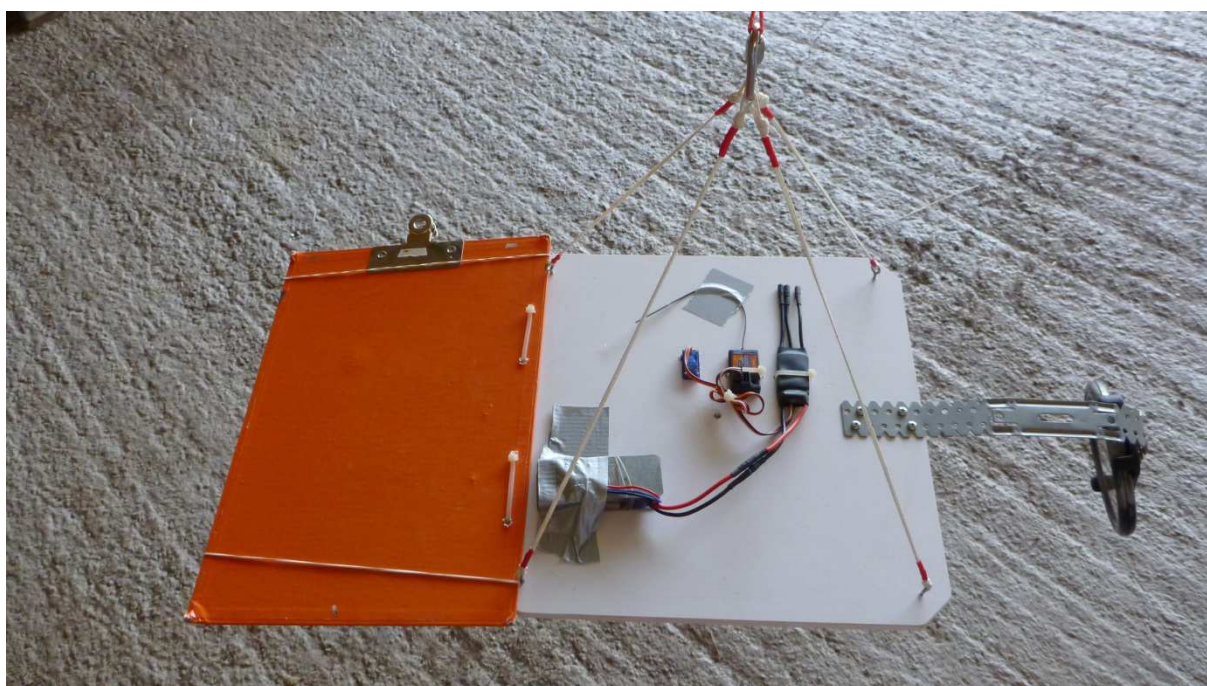
## 12 Shozové zkoušky modelu

Pro ověření funkčnosti konstrukce dělitelného slideru a zjištění průběhu otevírání padáku vybaveného tímto sliderem byly realizovány shozové zkoušky. Tyto zkoušky byly provedeny ve vojenské sušící věži, která se používá pro sušení padáků po seskocích za nepříznivých povětrnostních podmínek a po seskocích s přistáním na vodní plochu. Věž je ve správě 102. průzkumného praporu v Prostějově.

Celková vnitřní výška věže je 15 m, maximální použitelná výška pro potřeby shozů je 13 m. Nejbližší stěna věže byla vzdálena 4,5 m od vypouštěcího zařízení.

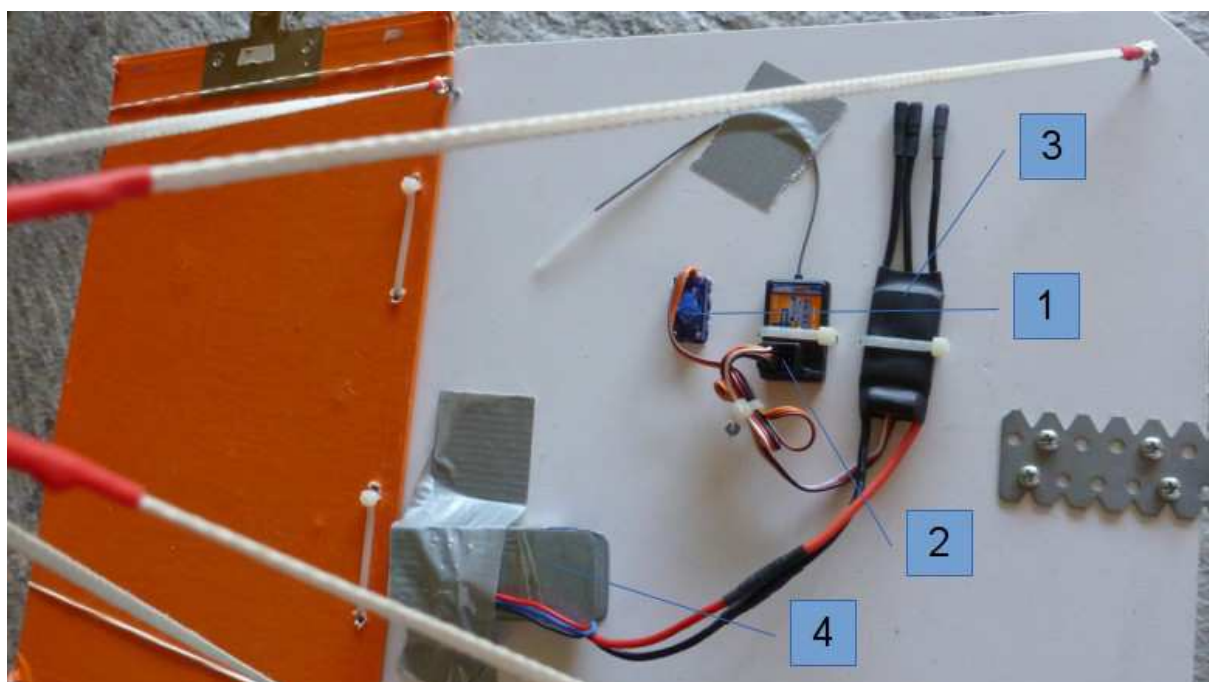
### 12.1 Vypouštěcí zařízení

Jelikož sušící věž je vybavena pouze ze země elektricky ovládanými ráhny na vytahování padáků a není vybavena žádným zařízením pro osobní výstup do požadované výšky shozu, bylo nutné vyrobit vypouštěcí zařízení a toto vypouštěcí zařízení spolu s padákem nechat zdvihnout vytahovacím ráhnem do požadované výšky shozu.



Obr. 12.1 Horní pohled na vypouštěcí zařízení.

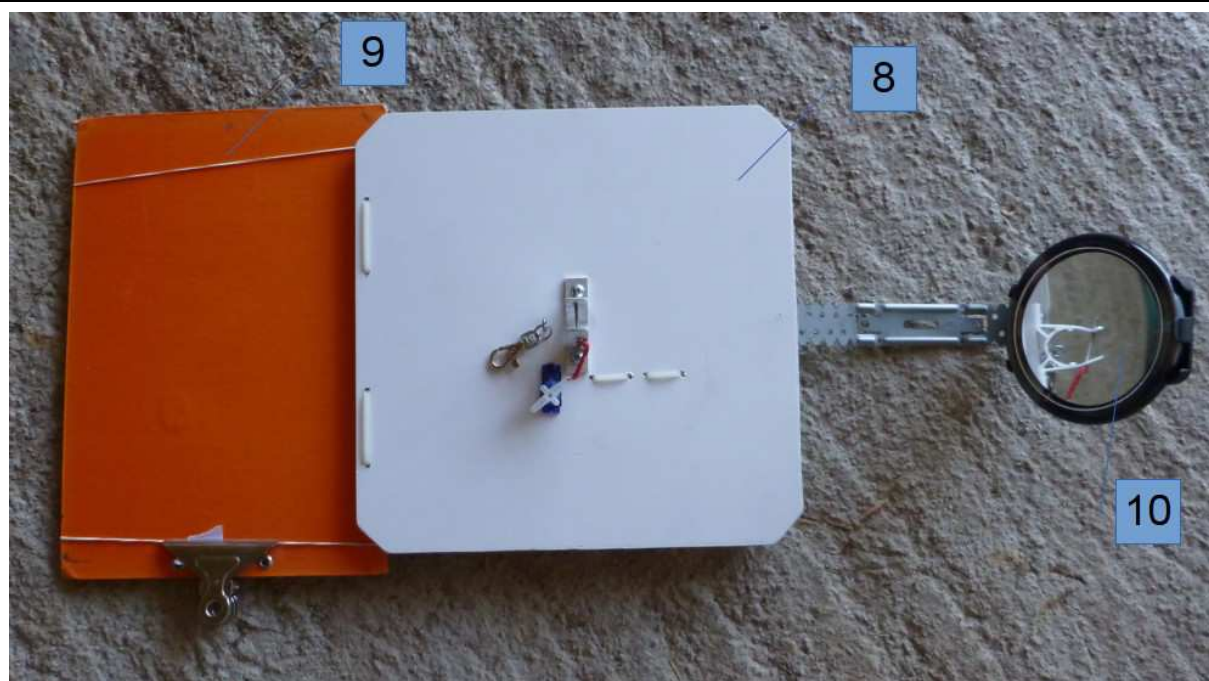




Obr. 12.2 Detail osazení vypouštěcího zařízení.



Obr. 12.3 Detail třmenu s vypouštěcím trnem.



Obr. 12.4 Spodní pohled na vypouštěcí zařízení.

Základem vypouštěcího zařízení je plastová deska (8), ke které byl připevněn třmen (5), jímž prochází vypouštěcí trn (6). Pohyb tohoto trnu je ovládán modelářským servem (1), které je připojeno k přijímači (2). Napájení přijímače je řešeno baterií (4) přes regulátor (3). Dále je k základní desce připevněno závěsné oko kontejneru vrchlíku (7), stavitelné zvětšovací zrcátko (10) pro zobrazení pohybu vypouštěcího trnu a deska pro připevnění čísla měření (9). Celá základová deska je vybavena lanky pro zavěšení na zvedací ráhno. Vypouštěcí mechanismus je ovládán dálkově pomocí modelářského vysílače.

servo	HXT 900
přijímač	HK-GT2
regulátor	HK-30A
vysílač	HK-T6A V2
baterie	Li-Pol, 2 články 7,4V

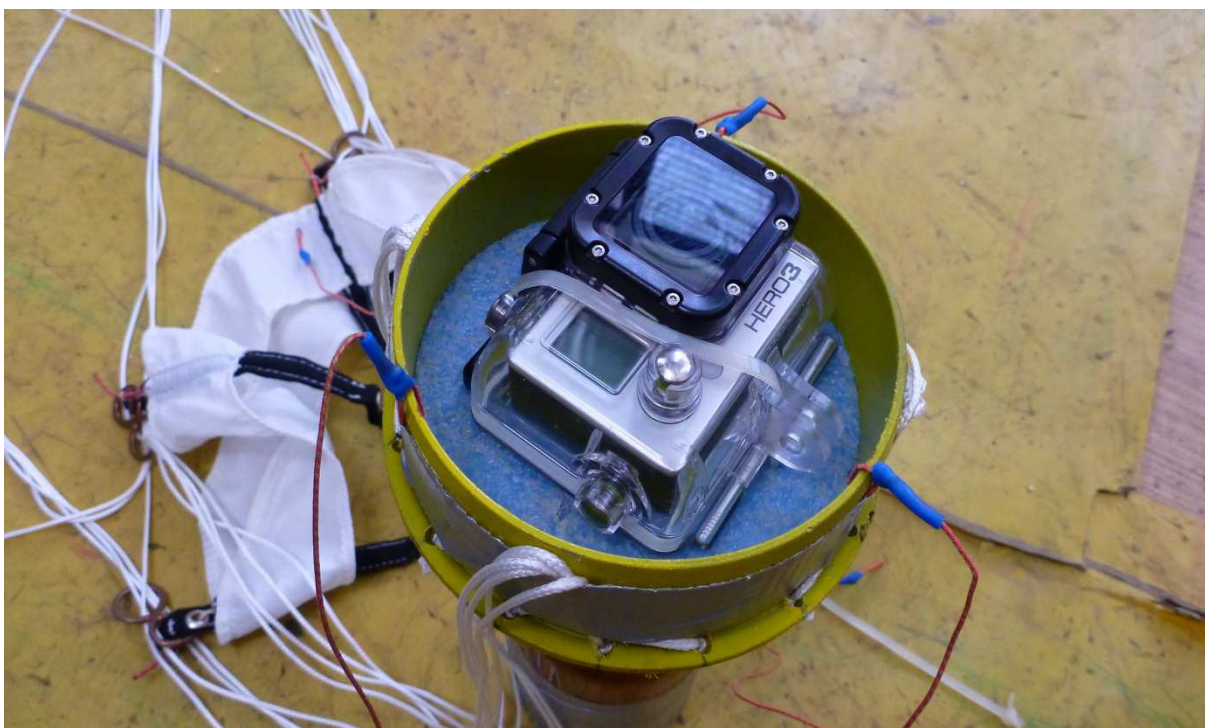
Tab. 12.1 Použité komponenty vypouštěcího zařízení.



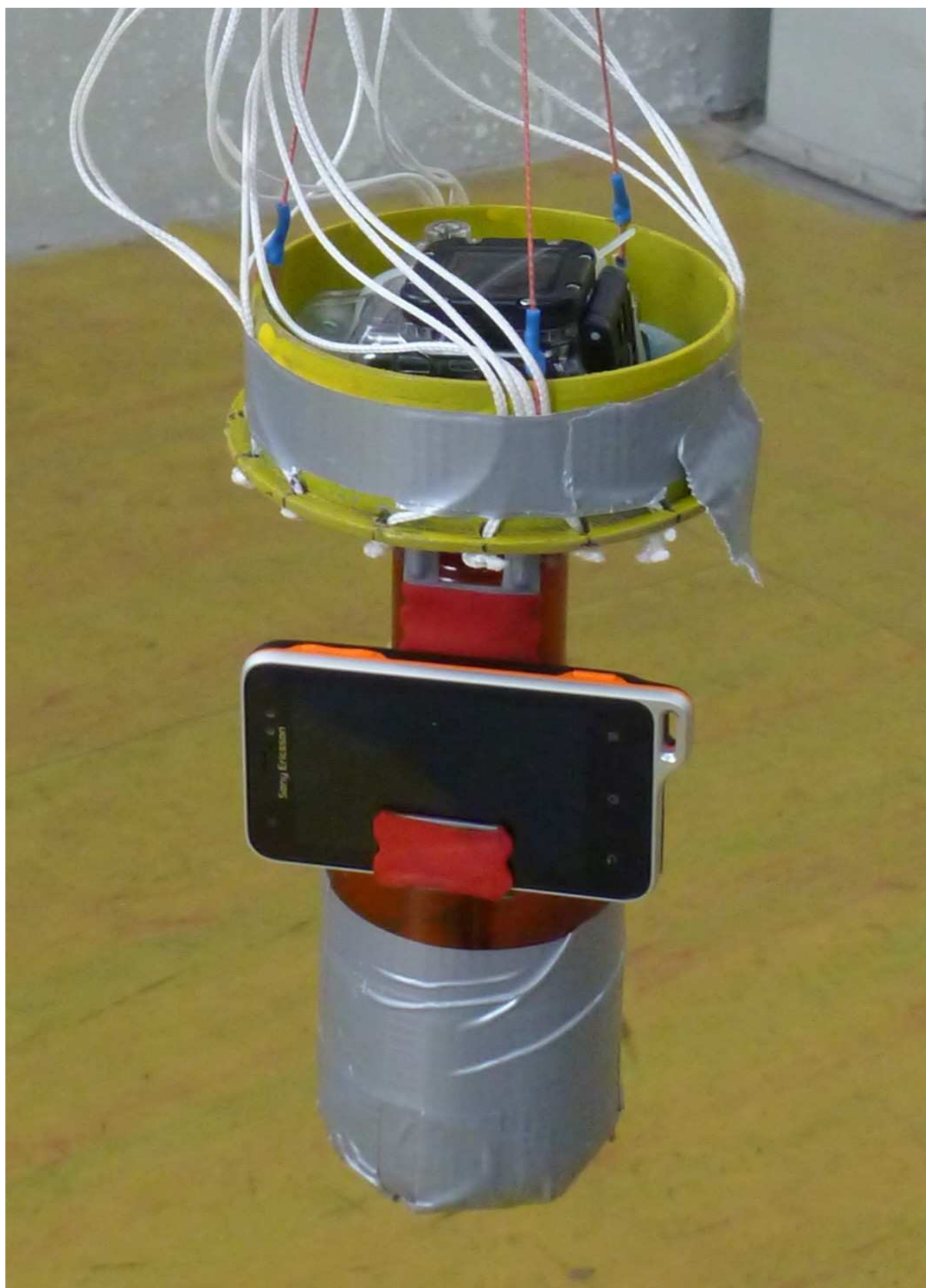
## 12.2 Měřící zařízení

Pro vyhodnocení shozových zkoušek byla zvolena metoda rozboru videozáznamu, pokusně doplněná o průběh zrychlení z improvizovaného akcelerometru. Z tohoto důvodu bylo podvěšené těleso tvořeno miskou, ke které byly po obvodu připevněny nosné šňůry vrchlíku. Do této misky byla vložena kamera viz Obr. 12.5 a 12.6. Dále byla k misce připevněna PET lahev, do které se přidáváním kameniva nastavovala požadovaná hmotnost soustavy a držák pro mobilní telefon pro doplňkové měření násobku tíhového zrychlení.

Průběh shozové zkoušky byl dále natáčen z bočního pohledu kamerou, která byla umístěna na stativu na zemi sušící věže.



Obr. 12.5 Umístění podvěšené kamery v misce podvěšeného tělesa.



Obr. 12.6 Podvěšené těleso s připevněnou kamerou a mobilním telefonem.

podvěšená kamera	GoPro Hero 3
boční kamera	Panasonic DMC-FT4
akcelerometr	Mobilní telefon Sony Ericsson Xperia Active aplikace „Physics Toolbox Accelerometer“, OS Android rozsah $\pm 2g$

Tab. 12.2 Použité komponenty měřicího zařízení.

### 12.3 Identifikace měření

Pro potřeby identifikace jednotlivých shozů, bylo k desce připevněno označení čitelné ze záznamu podvěšené kamery. Bylo zvoleno následující značení viz Tab. 12.3.

dt_0x_xxxx_xx_0x		
1. 2. 3. 4. 5.		
pozice	značení	popis
1.	dt	označení shozové zkoušky (drop test)
2.	0x	pořadové číslo sady měření
3.	slup/sldn/slud	poloha slideru: nahoře/dole/nahoře dělitelný
4.	np/pd	stav padáku: padák nezabalen/padák zabalen
5.	0x	pořadové číslo měření

Tab. 12.3 Značení jednotlivých shozových zkoušek.

### 12.4 Shozové zkoušky pro ověření plnění vrchlíku s dělitelným sliderem

Hlavním cílem těchto shozových zkoušek bylo zjištění mechanismu plnění vrchlíku padáku vzduchem při použití dělitelného slideru. Potřeba těchto zkoušek byla nutná z důvodu odlišné konstrukce dělitelného slideru od stávajících (nedělitelných) sliderů. U stávající konstrukce jsou po obvodě látkového prstence rozmístěny kovové průchodky v počtu nosných šňůr vrchlíku. Těmito průchodkami je samostatně provlečena každá nosná šňůra vrchlíku. Dělitelný slider se konstrukčně odlišuje tím, že bylo zvoleno sdružit vždy několik nosných šňůr do jedné průchodky. Vliv této konstrukční změny na plnění vrchlíku padáku vzduchem byl předmětem této části shozových zkoušek.

### 12.4.1 Vlastní měření

#### Podmínky měření:

Datum měření	14.7. 2014
Padák	Kruhový, plochý, celolátkový průměr 1,66 m 16 polí, 16 nosných šňůr materiál vrchlíku nylon F111 délka nosných šňůr 1,66 m
Hmotnost soustavy	1 kg
Výška shozu	8 m
Počáteční rychlost soustavy	$0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$
Frekvence snímání podvěšené kamery	100 fps
Frekvence záznamu akcelerometru	80 zápisů za sekundu
Teplota vzduchu	25 °C
Tlak vzduchu	1008 hPa
Relativní vlhkost vzduchu	62 %

Tab. 12.4 Podmínky měření.

Měření se skládalo z celkem deseti shozů. Pětkrát byl proveden shoz se sliderem, pětkrát bez slideru. Všechny shozy byly zaznamenány podvěšenou kamerou, boční kamerou na stativu a průběh zrychlení byl zaznamenán akcelerometrem.

Padák byl za kroužek na svém vrcholu navlečen na vypouštěcí trn a jednotlivá pole vrchlíku byla vytažena do stran viz Obr. 12.7. Při testech se sliderem bylo nutné slider držet šňůrkou ve vrchní pozici na dorazech vrchlíku, aby před vypuštěním vlastní tíhou nesjel po nosných šňůrách. Šňůrka byla provlečena průchodkou ve vrcholu vrchlíku a navlečena též na vypouštěcí trn. Společně s vypuštěním padáku byla uvolněna i šňůrka držící slider ve vrchní pozici.



Obr. 12.7 Zavěšení padáku ve vypouštěcím zařízení.

## 12.4.2 Vyhodnocení měření

K rozboru videozáznamů byl použit software Avidemux (GTK+) operačního systému Linux. Ze záznamů akcelerometru byly vytvořeny grafy závislosti násobku přetížení na čase.

Měření	Čas otevření [s] videozáznam
dt_01_slup_np_01	1.25
dt_01_slup_np_02	1.21
dt_01_slup_np_03	1.23
dt_01_slup_np_04	1.21
dt_01_slup_np_05	1.22
<b>aritmetický průměr</b>	<b>1.22</b>
směrodatná odchylka	0.02

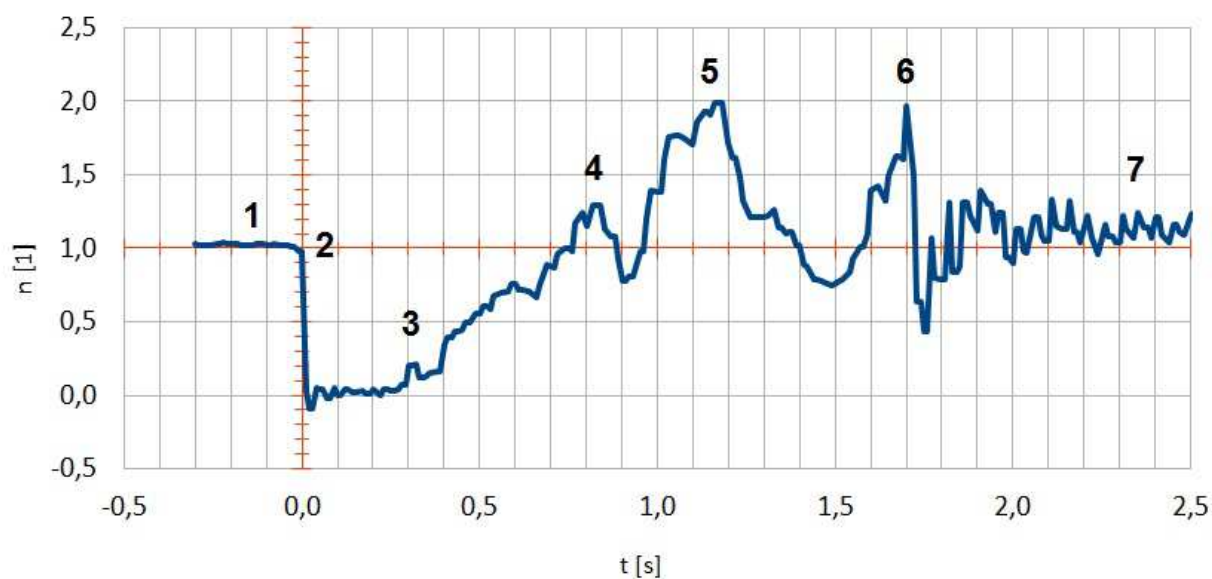
Tab. 12.5 Časy otevření padáku vybaveného sliderem.

Měření	Čas otevření [s] videozáznam
dt_02_sldn_np_01	0.80
dt_02_sldn_np_02	0.79
dt_02_sldn_np_03	0.85
dt_02_sldn_np_04	0.82
dt_02_sldn_np_05	0.83
<b>aritmetický průměr</b>	<b>0.82</b>
směrodatná odchylka	0.02

Tab. 12.6 Časy otevření padáku bez slideru.

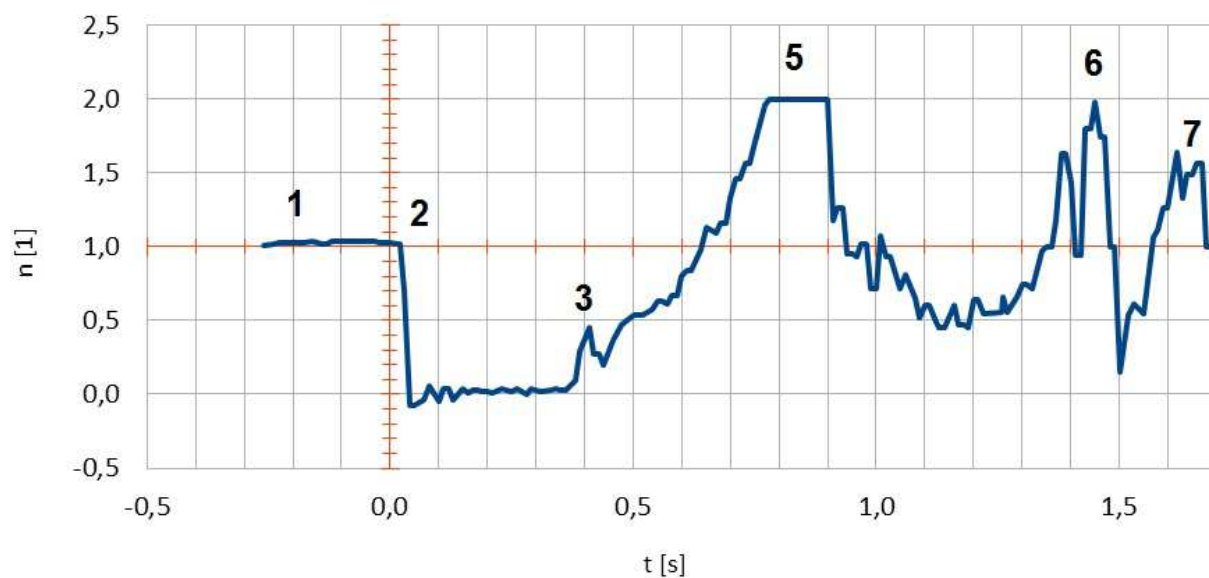


dt\_01\_slup\_np\_04

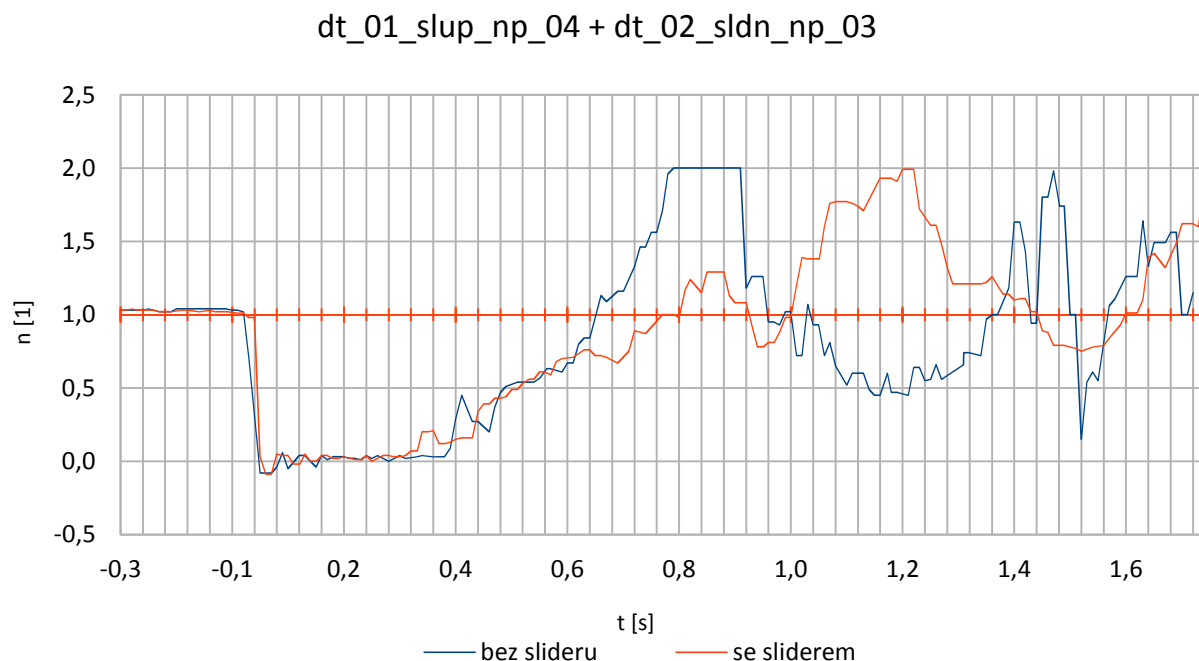


Obr. 12.8 Typický průběh násobku tírového zrychlení při otevírání modelu padáku se sliderem.

dt\_02\_sldn\_np\_03



Obr. 12.9 Typický průběh násobku tírového zrychlení při otevírání modelu padáku bez slideru.



Obr. 12.10 Porovnání průběhů násobků tíhového zrychlení při otevírání modelu padáku se sliderem a bez slideru.

Jelikož pro měření zrychlení byl pokusně použit improvizovaný akcelerometr, který je součástí mobilního telefonu a má rozsah pouze  $\pm 2g$ , není z jeho záznamu možné přesně určit čas otevření ani velikost maximálního násobku přetížení. Nicméně se ukázal jako velice užitečný pro určení charakteristických okamžiků během otevírání padáku. Z průběhu na Obr. 12.8 lze při porovnání s videozáznamem vyčíst následující charakteristické úseky otevírání.

1. zavěšení padáku před vypuštěním
2. vypuštění padáku
3. začátek plnění vrchlíku vzduchem
4. začátek pohybu slideru směrem dolů
5. plné nafouknutí padáku
6. deformace vrchlíku vlivem přeplnění vzduchem (wake re-contact)
7. ustálené klesání

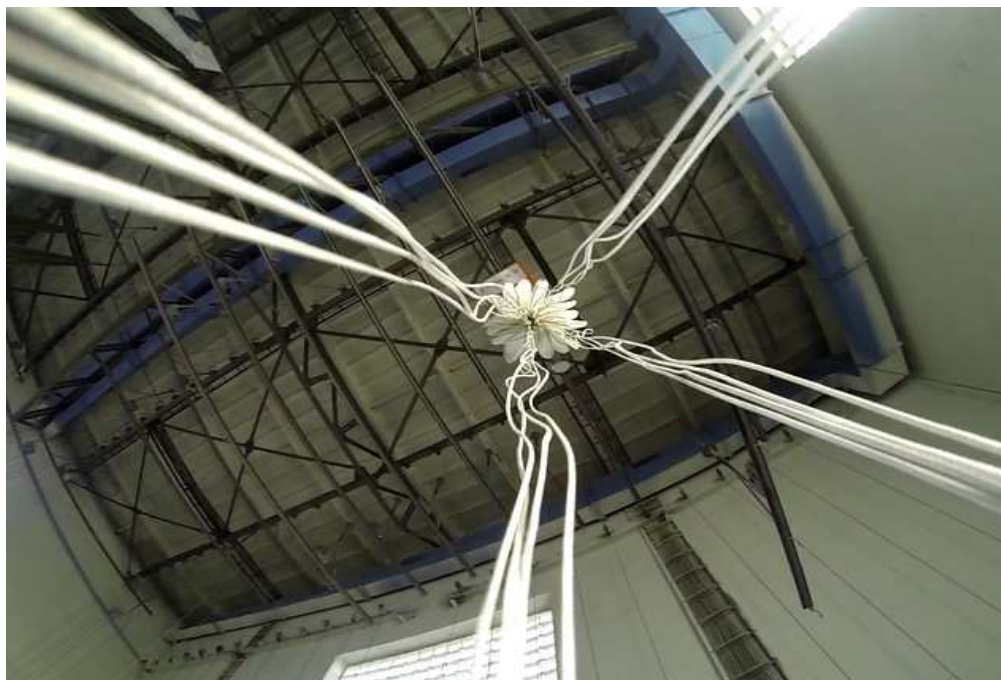


## 1. Zavěšení padáku před vypuštěním



Obr. 12.11 Zavěšení padáku před vypuštěním.

## 2. Vypuštění padáku



Obr. 12.12 Padák v okamžiku těsně po vypuštění.

Při vypuštění padáku dochází k chvilkovému navolnění nosných šňůr vlivem jejich pružnosti viz Obr. 12.12.

### 3. Okamžik začátku plnění vrchlíku padáku vzduchem



Obr. 12.13 Plnění vrchlíku padáku se sliderem v horní pozici.

Slider je svým aerodynamickým odporem fixován na dorazech vrchlíku, do vrchlíku proudí vzduch středovým otvorem slideru a též po obvodu slideru v mezerách mezi kovovými průchodkami viz Obr. 12.13.

### 4. Okamžik začátku pohybu slideru směrem dolů



Obr. 12.14 Okamžik začátku pohybu slideru směrem dolů.

Vrchlík padáku se sliderem, v horní pozici na dorazech, je již plně naplněn vzduchem. Vlivem obtékání vrchlíku zvyšující se rychlostí dochází k téměř úplnému uzavření polí vrchlíku mezi průchodkami viz Obr. 12.14. Jelikož je v tomto okamžiku plněn prakticky pouze středovým otvorem slideru, dochází ke krátkodobému poklesu v jinak takřka lineárním průběhu zvětšování odporové plochy vrchlíku, a tím jeho odporové síly. Po dalším navýšení objemu pojmutého vzduchu dochází ke zvětšení sil v nosných šňůrách a k pohybu slideru směrem dolů. Mění se též tvar slideru vlivem sil v nosných šňůrách z kruhového na téměř čtvercový.

## 5. Plně nafouknutí padáku



Obr. 12.15 Plně nafouknutý padák.



## 6. Deformace vrchlíku vlivem jeho přeplnění vzduchem



Obr. 12.16 Deformace vrchlíku vlivem jeho přeplnění vzduchem.

Vlivem rapidního nárůstu odporové plochy vrchlíku v závěrečné fázi jeho plnění dochází k jeho přeplnění - zvýšení tlaku vzduchu uvnitř vrchlíku více než by odpovídalo momentálnímu režimu klesání. Tento objem vzduchu rychle expanduje a je vypuzen z vrchlíku přes jeho obvod zpravidla na jedné straně, čímž dochází na této straně k poměrně masivní deformaci vrchlíku viz Obr. 12.16. Tento jev v tomto případě navíc zhoršuje použitý vrchlík padáku, který je celolátkový bez ventilačního otvoru a dalších případných výřezů a klapků, přes které by mohl vzduch uniknout cestou „skrz vrchlík“ a zmírnit tak jeho deformaci.

## 7. Fáze ustáleného klesání



Obr. 12.17 Vrchlák ve fázi ustáleného klesání.

### 12.4.3 Závěr měření

Hlavním cílem těchto shozových zkoušek bylo zjištění mechanismu plnění vrchlíku padáku vzduchem při použití dělitelného slideru. Tento cíl byl splněn rozбором videozáznamů z provedených pěti shozových zkoušek otevírání padáku se sliderem.

Uvedeným rozбором bylo zjištěno, že sdružení více nosných šňůr do jedné průchodky slideru nemá vliv na symetrii plnění vrchlíku padáku vzduchem. Dělitelný slider v tomto konstrukčním uspořádání se z hlediska funkce vyrovná klasickým sliderům a může tedy být po patřičném rozměrovém nadimenzování použit jako náhrada za slider klasický.

Též bylo provedeno pět shozových zkoušek bez instalovaného slideru za účelem porovnání otevíracích časů metodou odečtu z videozáznamu.

Výsledný průměrný čas určený z videozáznamu:

<b>Čas otevření padáku se sliderem</b>	<b><math>1,22 \pm 0,02</math> s</b>
<b>Čas otevření padáku bez slideru</b>	<b><math>0,82 \pm 0,02</math> s</b>

Tab. 12.7 Výsledné časy otevření padáku

Z uvedené tabulky je zřejmé, že otevírání padáku se sliderem je o 0,4 s delší, než otevírání padáku bez slideru.

## **12.5 Shozové zkoušky pro ověření funkčnosti dělení slideru**

Hlavním cílem těchto shozových zkoušek bylo ověřit funkci dělení slideru při otevírání padáku zabaleného v kontejneru vrchlíku a též porovnat otevírací časy vrchlíku se sliderem a otevírání při kterém se slider rozdělí.

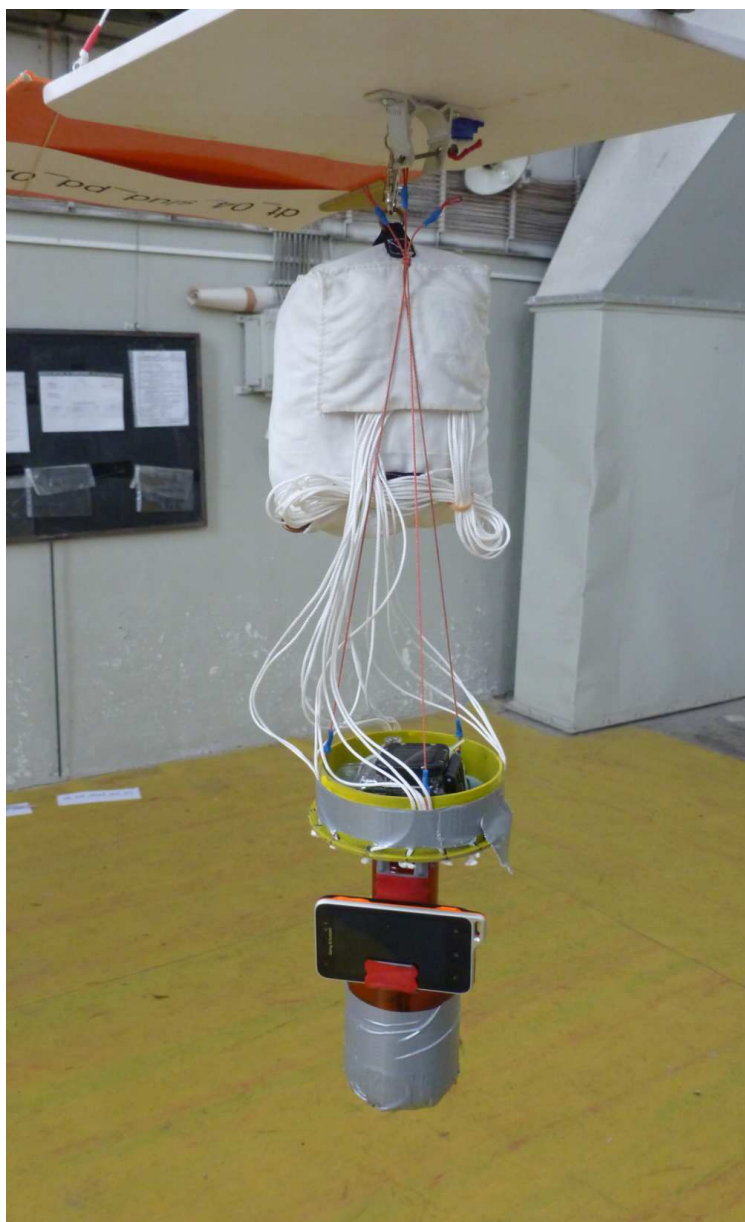
### **12.5.1 Vlastní měření**

Podmínky měření:

Datum měření	22.7. 2014
Padák	Kruhový, plochý, celolátkový, průměr 1,66 m 16 polí, 16 nosných šňůr materiál vrchlíku nylon F111 délka nosných šňůr 1,66 m
Hmotnost soustavy	1 kg
Výška shozu	12 m
Počáteční rychlost soustavy	$5,352 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$
Frekvence snímání podvěšené kamery	240 fps
Frekvence zápisu akcelerometru	80 zápisů za sekundu
Teplota vzduchu	28 °C
Tlak vzduchu	1005 hPa
Relativní vlhkost vzduchu	58 %

Tab. 12.8 Podmínky měření.

Měření se skládalo z celkem deseti shozů. Pětkrát byl proveden shoz zabaleného padáku se sliderem, pětkrát byl proveden shoz zabaleného padáku, při kterém se slider rozdělil. Všechny shozy byly zaznamenány podvěšenou kamerou, boční kamerou na stativu a průběh zrychlení byl zaznamenán akcelerometrem. Padák byl balen obvyklým způsobem používaným u kulatých padáků. Balení padáku viz Příloha č.4.



Obr. 12.18 Zavěšení zabaleného padáku k vypouštěcímu zařízení.

### 12.5.2 Vyhodnocení měření

K rozboru videozáznamů byl použit software Avidemux (GTK+) operačního systému Linux. Ze záznamů akcelerometru byly vytvořeny grafy závislosti násobku přetížení na čase.

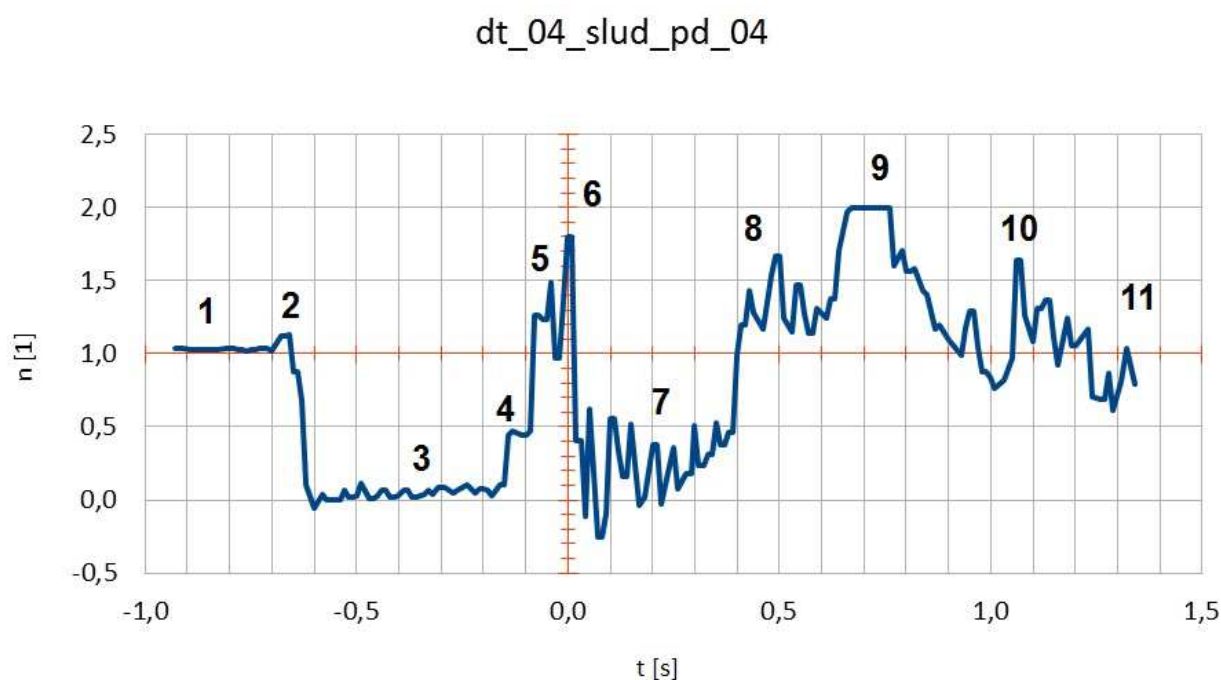
Měření	Čas otevření [s] videozáznam
dt_03_slup_pd_01	1.05
dt_03_slup_pd_02	0.97
dt_03_slup_pd_03	1.01
dt_03_slup_pd_04	0.98
dt_03_slup_pd_05	0.95
<b>aritmetický průměr</b>	<b>0.99</b>
směrodatná odchylka	0.04

Tab. 12.9 Časy otevření zabaleného padáku vybaveného sliderem.

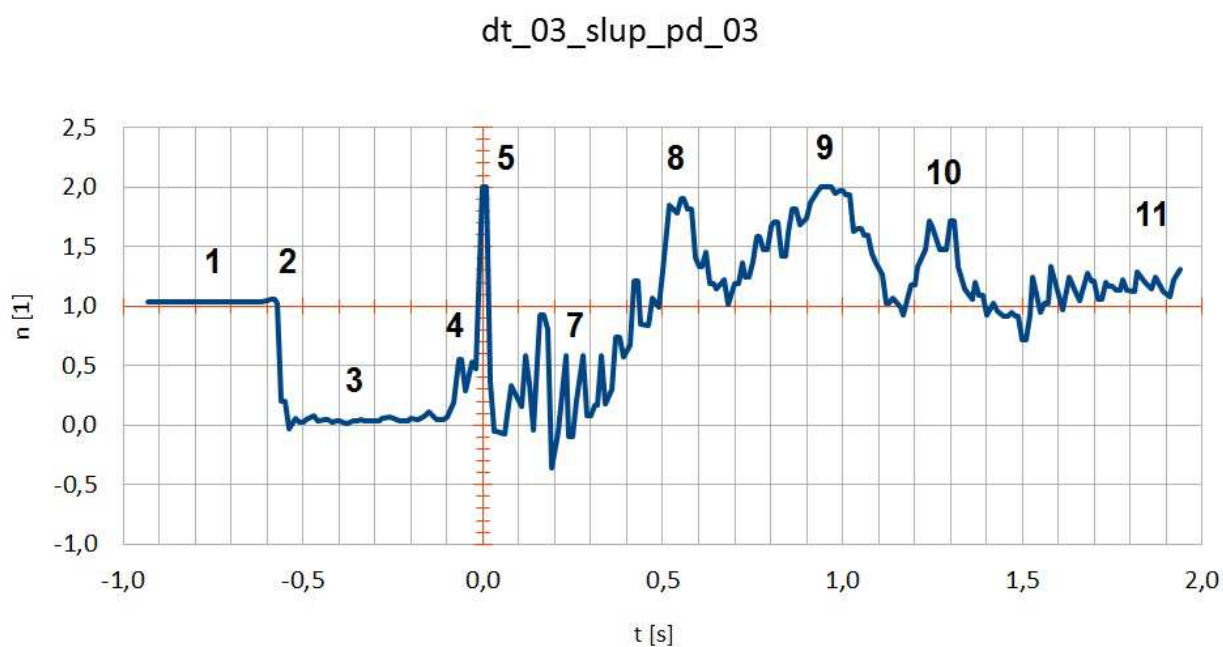
Měření	Čas otevření [s] videozáznam
dt_04_slup_pd_01	0.72
dt_04_slup_pd_02	0.69
dt_04_slup_pd_03	0.77
dt_04_slup_pd_04	0.73
dt_04_slup_pd_05	0.86
<b>aritmetický průměr</b>	<b>0.75</b>
směrodatná odchylka	0.07

Tab. 12.10 Časy otevření zabaleného padáku, při kterém se slider rozdělil.



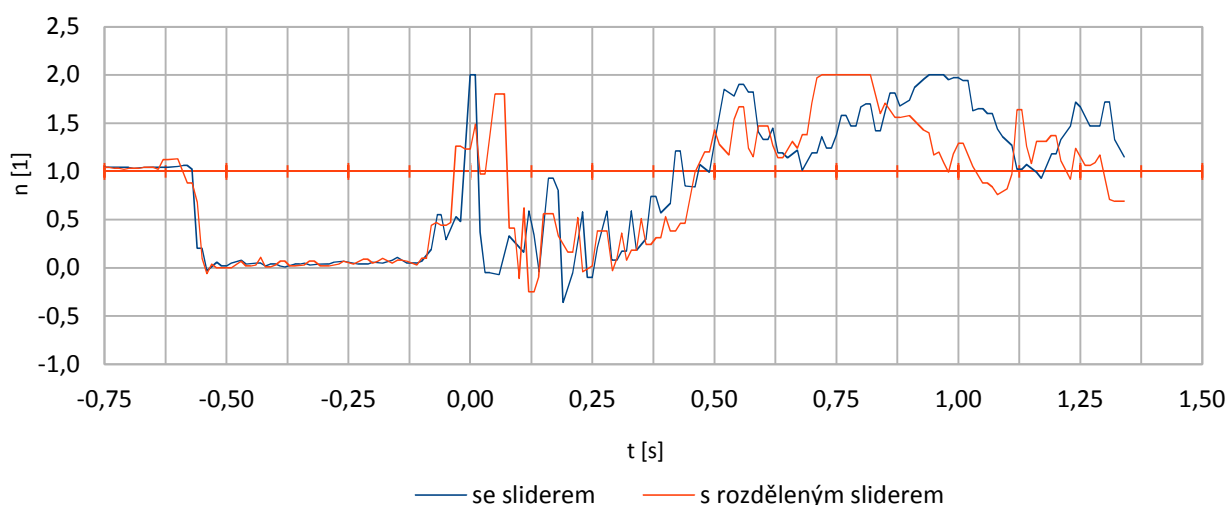


Obr. 12.19 Typický průběh násobku tíhového zrychlení při otevírání modelu padáku, při kterém se slider rozdělil.



Obr. 12.20 Typický průběh násobku tíhového zrychlení při otevírání modelu padáku se sliderem.

dt\_03\_slup\_pd\_03 + dt\_04\_slud\_pd\_04



Obr. 12.21 Porovnání průběhů násobku tíhového zrychlení se sliderem a rozděleným sliderem.

Jelikož pro měření zrychlení byl pokusně použit improvizovaný akcelerometr, který je součástí mobilního telefonu a má rozsah pouze  $\pm 2g$ , není z jeho záznamu možné přesně určit čas otevření ani velikost maximálního násobku přetížení. Nicméně se ukázal jako velice užitečný pro určení charakteristických okamžiků během otevírání padáku. Z průběhu na Obr. 12.19 lze při porovnání s videozáznamem vyčíst následující charakteristické úseky otevírání.

1. zavěšení padáku před vypuštěním
2. vypuštění padáku
3. vytahování nosných šňůr padáku z kontejneru vrchlíku
4. propuštění nosných šňůr
5. vytažení nosných šňůr z gumiček
6. rozdělení slideru
7. vytahování vrchlíku z kontejneru vrchlíku
8. plnění vrchlíku padáku vzduchem
9. plné nafouknutí padáku
10. deformace vrchlíku vlivem přeplnění vzduchem (wake re-contact)
11. ustálené klesání

## Fáze otevírání padáku, při kterém se slider rozdělil

### 1. Zavěšení padáku před vypuštěním



Obr. 12.22 Zavěšení padáku před vypuštěním.

### 2. Vypuštění padáku

### 3. Vytahování nosných šňůr padáku z kontejneru vrchlíku



Obr. 12.23 Vytahování nosných šňůr padáku z kontejneru vrchlíku.

#### **4. Propružení nosných šňůr**

Na všech záznamech průběhu násobku tíhového zrychlení jsou patrné lokální extrémy, které jsou způsobené pružností nosných šňůr a tkaniny padáku.

#### **5. Vytažení nosných šňůr z gumiček**

Dva vrcholy značí vytažení nosných šňůr padáku z jedné a druhé gumičky kontejneru vrchlíku.

#### **6. Rozdělení slideru**



Obr. 12.24 Okamžik rozdělení slideru.

Slider je rozdělen vytažením lanek procházejících lemovkami ke krajním kovovým průchodkám. Potřebná síla k vytažení těchto lanek je jasně patrná na průběhu násobku tíhového zrychlení.

#### **7. Vytahování vrchlíku z kontejneru vrchlíku**

Slider je rozdělen a nebrání rychlému plnění vrchlíku padáku vzduchem.



## 8. Plnění vrchlíku padáku vzduchem



Obr. 12.25 Plnění padáku vzduchem, slider volně odpadává.

## 9. Plně nafouknutí padáku

### 10. Deformace vrchlíku vlivem přeplnění vzduchem (wake re-contact)

Deformace vrchlíku s rozděleným sliderem není tak markantní jako v případě otevírání bez slideru díky průchodkám, které nedovolí zpočátku plně nafouknutí.

### 11. Fáze ustáleného klesání



Obr. 12.26 Plně nafouknutý padák.

### 12.5.3 Závěr měření

Hlavním cílem těchto shozových zkoušek bylo ověřit funkci dělení slideru při otevírání padáku zabaleného v kontejneru vrchlíku a též porovnat otevírací časy vrchlíku se sliderem a s rozděleným sliderem.

Tento cíl byl splněn rozborem videozáznamů pěti shozových zkoušek otevírání padáku se sliderem a pěti shozových zkoušek otevírání padáku, při kterých se slider rozdělil.

Uvedeným rozborem byla ověřena bezproblémová funkčnost dělení slideru během otevírání padáku. Otevírání při kterém se slider rozdělí se průběhem plnění vrchlíku padáku vzduchem podobá otevírání padáku bez slideru.

Dále bylo zkouškami modelu pozorováno, že oddělené průchodky, kterými procházejí nosné šňůry padáku nesjíždějí dolů tak rychle, jak bylo očekáváno. Krátce po plném nafouknutí vrchlíku padáku jsou ještě poměrně vysoko a stažením nosných šňůr snižují odporovou plochu vrchlíku. Změřením a porovnáním odporových ploch byl ihned po plném nafouknutí padáku u vrchlíku bez slideru a vrchlíku s rozděleným sliderem zjištěn rozdíl mezi odporovými plochami 18 %. V případě tohoto modelu má toto zmenšení odporové plochy vrchlíku padáku příznivý vliv na zmenšení jeho deformace vlivem přeplnění vzduchem.

Výsledný průměrný čas otevření padáku:

Čas otevření padáku se sliderem	<b>0,99 ± 0,04 s</b>
Čas otevření padáku s rozděleným sliderem	<b>0,75 ± 0,07 s</b>

Tab. 12.11 Výsledné časy otevření padáku.

Z uvedené tabulky je zřejmé, že otevírání padáku se sliderem je o 0,24 s delší, než otevírání padáku při kterém se slider rozdělil.

### 12.6 Porovnání s výpočtem

Výpočet byl proveden pro porovnání se shozovými zkouškami sad dt\_04\_slup\_pd\_xx a dt\_02\_sldn\_np\_xx.

**dt\_04\_slup\_pd\_xx**

vypočítané			naměřené
metoda vodorovný směr	t <sub>0</sub> [s]	F <sub>max</sub> [N]	t <sub>0</sub> [s]
η=0, n <sub>p</sub> =0,5	1,172	7,925	0,75 ± 0,07
η=0,067, n <sub>p</sub> =0,5	1,05	7,878	
η=0,067, n <sub>p</sub> =0,63246	1,202	-	
metoda obecná trajektorie			
η=0,067, n <sub>p</sub> =0,63246	0,659	31,91	

Tab. 12.12 Porovnání naměřených a vypočítaných hodnot, viz Příloha č.10.

Výpočet se zjednodušením do vodorovného směru je v tomto případě nepoužitelný kvůli nízké rychlosti v okamžiku počátku plnění vrchlíku. Díky tomu je zde výrazný vliv tíhové síly (soustava z počátku zrychluje), která musí být zahrnuta. Vypočítaný čas metodou obecné trajektorie je o 0,091 s kratší, než průměrný naměřený čas při shozových zkouškách. Naměřený čas otevření prodlužuje síla nutná k rozdělení slideru při otevírání padáku, která ve výpočtu není zahrnuta.

**dt\_02\_sldn\_np\_xx**

vypočítané		naměřené
metoda obecná trajektorie	$t_0$ [s]	$t_0$ [s]
$\eta=0,064$ , $\eta_p=0,63246$	0.884	0,82 ± 0,02

Tab. 12.13 Porovnání naměřených a vypočítaných hodnot, viz Příloha č. 10.

Vypočítaný čas metodou obecné trajektorie je o 0,064 s delší, než průměrný naměřený čas při shozových zkouškách.

## 13 Závěr

Hlavním přínosem doktorské práce je konstrukční řešení, které rozšiřuje obálku použitelnosti záchranné soustavy v oblasti jejího statisticky nejčastějšího použití, tzn. v malých výškách a při malých rychlostech letu (pádu).

### Vymezení jednotlivých cílů:

1. zpracování výpočetního návrhu kruhového vrchlíku pro padákové záchranné soustavy lehkých sportovních letadel,
2. prověření možností řízení otevírání padáků použitelných u padákových záchranných soustav pro letadla,
3. návrh vrchlíku padáku a metody řízení jeho plnění pro použití na vyšším rozsahu rychlostí,
4. ověření vlastností na modelech při pozemních a shozových zkouškách.

### Dosažení jednotlivých cílů

1. Výpočetní návrh je založen na Pflanz - Ludtke metodě ve vodorovném směru otevírání. S pomocí v této metodě použitého zjednodušení byly znovu odvozeny explicitní výpočetní vztahy. Následně byly pro tuto metodu odvozeny nové výpočetní vztahy bez použití zjednodušení a zpracovány pro numerické řešení v programu Mathcad. Pro Mathcad byla též naprogramována iterační metoda výpočtu v obecném směru otevírání.

Vypočítané hodnoty pomocí těchto metod byly porovnány s naměřenými hodnotami při shozových zkouškách modelu.

2. V dizertační práci je uveden celkový přehled jednotlivých způsobů řízení otevírání kruhových vrchlíků, dále jejich výhody a nevýhody a diskutována případná možnost použití v záchranných soustavách pro letadla.
3. Na základě předchozího bodu byla vybrána metoda řízení otevírání padáku pomocí středové šňůry, pro jejíž ověření byly ušity dva modely kruhového vrchlíku o průměru 1,5 m a oba orientačně proměřeny při vlekcích zkouškách za automobilem. I přes nové pojetí konstrukce vrchlíku padáku a zlepšení jeho vlastností v oblasti stability nebylo dosaženo přesvědčivých výsledků a metoda řízení otevírání pomocí středové šňůry byla pro vrchlíky padákových záchranných soustav zavržena.

Po zavržení této metody byl změněn přístup ke konstrukci vrchlíku a byl vyvinut



dělitelný slider. Dělitelný slider, jeho konstrukce a mechanismus dělení je inovativním prvkem jak u padákových záchranných soustav pro letadla, tak celkově v oblasti padáků. Proto byla dne 14. 8. 2014 na Úřadu průmyslového vlastnictví v Praze podána nová přihláška vynálezu s názvem „Zařízení pro regulaci rychlosti otevírání padáku“ pod číslem PV 2014-543.

4. Dva modely padáku byly ušity pro řízení pomocí středové šňůry a orientačně proměřeny při vlekových zkouškách za automobilem

Pro shozové zkoušky byl vyroben model dělitelného slideru a ušit nový model padáku. Zkoušky byly provedeny v 15 m vysoké sušící věži. Celkem bylo provedeno 20 měřených shozových zkoušek rozdělených do dvou sad podle účelu. První sada měla za úkol prověřit mechanismus plnění vrchlíku padáku vzduchem při použití dělitelného slideru a druhá sada prověřit mechanismus vlastního dělení slideru. Zkoušky byly úspěšné a ověřily předpokládané vlastnosti a funkčnost konstrukčního řešení.

## Seznam použitých zdrojů

- [1] MÜLLER, W., *Parachutes for Aircraft*. National Advisory Committee for Aeronautics. Technical Memorandums. No. 450, October 28, 1927.
- [2] O'HARA, F., *Notes on the Opening Behavior and the Opening Forces of Parachutes*. Journal of the Royal Aeronautical Society. Vol. 53, 1949.
- [3] FRENCH, K.E., *Inflation of a Parachute*. AIAA Journal. Vol. 1. No. 11, 1963.
- [4] HEINRICH, H.G., NOREEN, R.A., *Analysis of Parachute Opening Dynamics with Supporting Wind-Tunnel Experiments*. Journal of Aircraft. Vol. 7. No. 4, 1970.
- [5] PAYNE, P.R., *A New Look at Parachute Opening Dynamics*. Aeronautical Journal, 1973.
- [6] IBRAHIM, S.K., *Potential Flowfield and Added Mass of the Idealized Hemispherical Parachute*. Journal of Aircraft. Vol. 4. No. 2, 1967.
- [7] EATON, J.A., *Added Fluid Mass and the Equations of Motion of a Parachute*. Aeronautical Quarterly. Vol. 34, 1983.
- [8] YAVUZ, T., *Determining and Accounting for a Parachute Virtual Mass*. Journal of Aircraft. Vol. 26. No. 5, 1989.
- [9] REDDY, K.R., *Unsteady Vortex Flow Past an Inflating, Decelerating Wedge*. Journal of Aircraft. Vol. 11. No. 7, 1974.
- [10] KLIMAS, P.C., *Inflating Parachute Canopy Differential Pressures*. Journal of Aircraft. Vol. 16. No. 12, 1979.
- [11] ROBERTS, B.W., *Aerodynamic Inflation of Shell Type, Parachute Structures*. Journal of Aircraft. Vol. 11. No. 7. July, 1974.
- [12] DESANTIS, G.C., *The Internal and External Flow Field Associated with Parachutes During Inflation*. U.S. Army Natick Lab. Technical Report, 1970.
- [13] KLIMAS, P.C., *Helium Bubble Survey of An Opening Parachute Flowfield*. Journal of Aircraft. Vol. 10. No. 9, 1973.
- [14] LINGARD, J.S., *The Aerodynamics of Parachutes During the Inflation Process*. Ph.D. thesis. Department of Aeronautical Engineering. University of Bristol, England, 1978.
- [15] DESABRAIS, K.J., *Velocity Field Measurements in the Near Wake of a Parachute Canopy*. Ph.D. thesis. Worcester Polytechnic Institute. England, 2002.

- [16] JONES, T.W, DOWNEY, J.M, LUNSFORD, Ch.B., *Experimental Methods Using Photogrammetric Techniques for Parachute Canopy Shape Measurements*. NASA Langley Research Center. Hampton VA, 2007.
- [17] HIGUCHI, H., BALLIGAND, H., and STRICKLAND, J.H., "*Numerical and Experimental Investigations of the Flow Over a Disk Undergoing Unsteady Motion*". *Journal of Fluids and Structures*. Vol. 10. No. 7, 1996.
- [18] LAMBERSON, D., HIGUCHI, H., and VAN ROOIJ, M., *Characteristics of Flow within Concave-nosed Bodies*. 15th CEAS/AIAA Aerodynamic Deceleration Systems Technology Conference. Toulouse. France, 1999.
- [19] KNACKE, T.W., *Parachute Recovery Systems Design Manual*. Para Publishing, 1992.
- [20] POYNTER, D., F., *The parachute manual : A rechnical treatise on aerodynamic decelerators*. Santa Barbara. Para Publishing, 1991.
- [21] MADYEW, R.C.;PETERSON, C., W., *Design and Testing of High- Performance Parachutes*. Specialized Printing Services Limited. Loughton, 1991.
- [22] BRS [online]. 2015. BRS aviation. Dostupné z WWW  
<[http://www.brsparachutes.com/brs\\_aviation\\_home.aspx](http://www.brsparachutes.com/brs_aviation_home.aspx)>.
- [23] GALAXY HIGH TECHNOLOGY [online]. 2015. Manuály. Dostupné z WWW  
<<http://www.galaxysky.cz/manualy-s16-cz>>.
- [24] U.S.H [online]. 2015. Dostupné z WWW  
<<http://www.ushrescue.com/>>.
- [25] STRATOS 07 [online]. 2015. Dostupné z WWW  
<<http://www.stratos07.cz/>>.
- [26] ALPHA PARACHUTES. [online]. 2015 Dostupné z WWW  
<<http://www.alphaparachute.com/eng/alpha.htm>>.
- [27] MVEN [online]. 2015. Dostupné z WWW  
<<http://www.mven.ru/articles/17/20/20/33>>.
- [28] *Investigation of Stability of Parachutes and Development of Stable Parachutes from Fabric of Normal Porosity*. Count Zeppelin Research Institute Report No. 300, 1943.
- [29] LUDTKE, W. P., *A New Approach to the Determination of the Steady-State Inflated Shape and Included Volume of Several Parachute Types*. NOLTR 69-

159, 1969.

- [30] LUDTKE, W. P., *A New Approach to the Determination of the Steady-State Inflated Shape and Included Volume of Several Parachute Types in 24-Gore and 30-Gore Configurations*. NOLTR 70-178, 1970.
- [31] PERSCHBACHER, T. , POTVIN, J., *The improved ideal parachute model and its application to the study of the inflation dynamics of slider-reefed ram-air and round parachutes*. 15th CEAS/AIAA Aerodynamic Deceleration Systems Technology Conference. Toulouse. France, 1999.
- [32] POTVIN, J., PEEK, G., *Three-Stage Model for Slider-Reefed Parafoil Inflation*. 19th CEAS/AIAA Aerodynamic Deceleration Systems Technology Conference. Williamsburg. Virginia, 2007.
- [33] DOHERR, K., F., *Parachute Flight Dynamics and Trajectory Simulation*. Heinrich Parachute Systems Short Course. University of St. Louis, 2002.
- [34] ZS2, *Požadavky pro uznání způsobilosti záchranných systémů pro SLZ*. Předpis LAA ČR, 1998.
- [35] BUTLER PARACHUTE SYSTEMS GROUP, Inc. [online]. 2015.  
Dostupné z WWW  
<<http://www.butlerparachutes.com/>>.
- [36] SADECK, J., E., LEE, C., K., *Continuous Disreefing Method for Parachute Opening*. Journal of Aircraft. Vol. 46. No. 2, 2009.
- [37] LUDTKE, W. P., *Notes On A Parachute Opening Force Analysis Applied To A Vertical Toward-The-Earth Trajectory*. NSWC TR 87-96, 1987.

## Seznam použitých zkratk

BMR	Balistický hmotnostní poměr
CFD	Computational fluid dynamics
DULV	Deutschen Ultraleichtflugverbandes
EASA	European Aviation Safety Agency
ELSA	Experimental Light Sport Aircraft
FAA	Federal Aviation Administration
LAA ČR	Letecká Amatérská Asociace ČR
LSA	Light Sport Aircraft
MTOW	Maximální vzletová hmotnost
PZS	Padáková záchranná soustava
SLZ	Sportovní létající zařízení
VLA	Very Light Aircraft
VPD	Vzletová a přistávací dráha
ZS2	Předpis LAA ČR

## Seznam použitého označení

2a	[m]	hlavní osa půlelipsy
$\bar{a}$	[m]	obtékaný rádius vrchlíku
$A_M$	[m <sup>2</sup> ]	plocha vstupního hrdla vrchlíku padáku
$A_{M0}$	[m <sup>2</sup> ]	plocha vstupního hrdla vrchlíku padáku v ustáleném klesání
$A_S$	[m <sup>2</sup> ]	tlaková plocha vrchlíku padáku
$A_{S0}$	[m <sup>2</sup> ]	tlaková plocha vrchlíku padáku v ustáleném klesání
b	[m]	vedlejší osa půlelipsy
b'	[m]	vedlejší osa půlelipsy
$C_D$	[1]	součinitel aerodynamického odporu padáku
$C_{DS}$	[m <sup>2</sup> ]	okamžitá odporová plocha vrchlíku
$C_{DS0}$	[m <sup>2</sup> ]	odporová plocha vrchlíku v režimu ustáleného klesání
$C_{Dsl}$	[1]	součinitel aerodynamického odporu slideru
$c_p$	[1]	tlakový součinitel vrchlíku padáku
$D_0$	[m]	nominální průměr vrchlíku padáku
$D_B$	[m]	průměr ekvivalentní plochy
$D_c$	[m]	konstrukční průměr vrchlíku padáku
$D_{inf}$	[m]	obtékaný průměr vrchlíku padáku
$D_{sl}$	[N]	odporová síla slideru
F	[N]	okamžitá otevírací síla
$F_{fric}$	[N]	třecí síla
$F_{max}$	[N]	maximální otevírací síla
$F_s$	[N]	síla při ustáleném klesání
$F_{slv}$	[N]	celková síla působící na slider (vertikální směr)
$F_{susp}$	[N]	síla v nosných šnůrách vrchlíku padáku
$F_{suspH}$	[N]	síla v nosných šnůrách (horizontální)
$F_{suspV}$	[N]	síla v nosných šnůrách (vertikální)
g	[m·s <sup>-2</sup> ]	tíhové zrychlení
k	[m <sup>3/2</sup> kg <sup>-1/2</sup> ]	koeficient propustnosti tkaniny
$L_{susp}$	[m]	délka nosných šnůr padáku
m	[kg]	celková hmotnost soustavy
M	[1]	balistický hmotnostní poměr
$m_{sl}$	[kg]	hmotnost slideru

$n_p$	[1]	exponent propustnosti tkaniny
$P$	$[m^3 \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}]$	propustnost vrchlíku padáku
$p$	[Pa]	tlak vzduchu
$q$	[Pa]	dynamický tlak proudu vzduchu
$S_0$	$[m^2]$	nominální plocha vrchlíku padáku
$S_c$	$[m^2]$	konstrukční plocha vrchlíku padáku
$S_{inf}$	$[m^2]$	obtékaná plocha vrchlíku padáku
$S_{sl}$	$[m^2]$	plocha slideru
$s_{sl}$	[m]	dráha slideru
$t$	[s]	okamžitý čas otevírání
$T_0$	[s]	okamžik aktivace záchranné soustavy
$t_0$	[s]	čas otevření padáku ( referenční čas)
$T_f$	[s]	okamžik nafouknutí padáku
$t_f$	[s]	čas konečného otevření padáku
$T_l$	[s]	okamžik přistání
$T_s$	[s]	okamžik oddělení kontejneru s raketou
$V$	$[m \cdot s^{-1}]$	okamžitá rychlost vzduchu
$V_s$	$[m \cdot s^{-1}]$	rychlost v okamžiku začátku plnění vrchlíku padáku
$W$	[N]	celková tíha soustavy
$W_{sl}$	[N]	tíhová síla slideru
$x_i$	[1]	součinitel dynamického rázu
$\Theta_c$	$[m^3]$	objem vzduchu pojmutého vrchlíkem padáku (vypočítaný)
$\Theta_g$	$[m^3]$	objem vzduchu pojmutého vrchlíkem padáku (geometrický)
$\varepsilon$	[°]	úhel nosných šnůr
$\gamma$	[°]	úhel nosných šnůr
$\eta$	[1]	součinitel velikosti plochy vstupního hrdla vrchlíku padáku
$\mu$	[1]	součinitel tření
$\rho$	$[kg \cdot m^{-3}]$	hustota vzduchu
$\rho_0$	$[kg \cdot m^{-3}]$	hustota vzduchu u hladiny moře
$\varphi$	[°]	úhel trajektorie letu (pádu)

Další použité označení vysvětleno v textu.

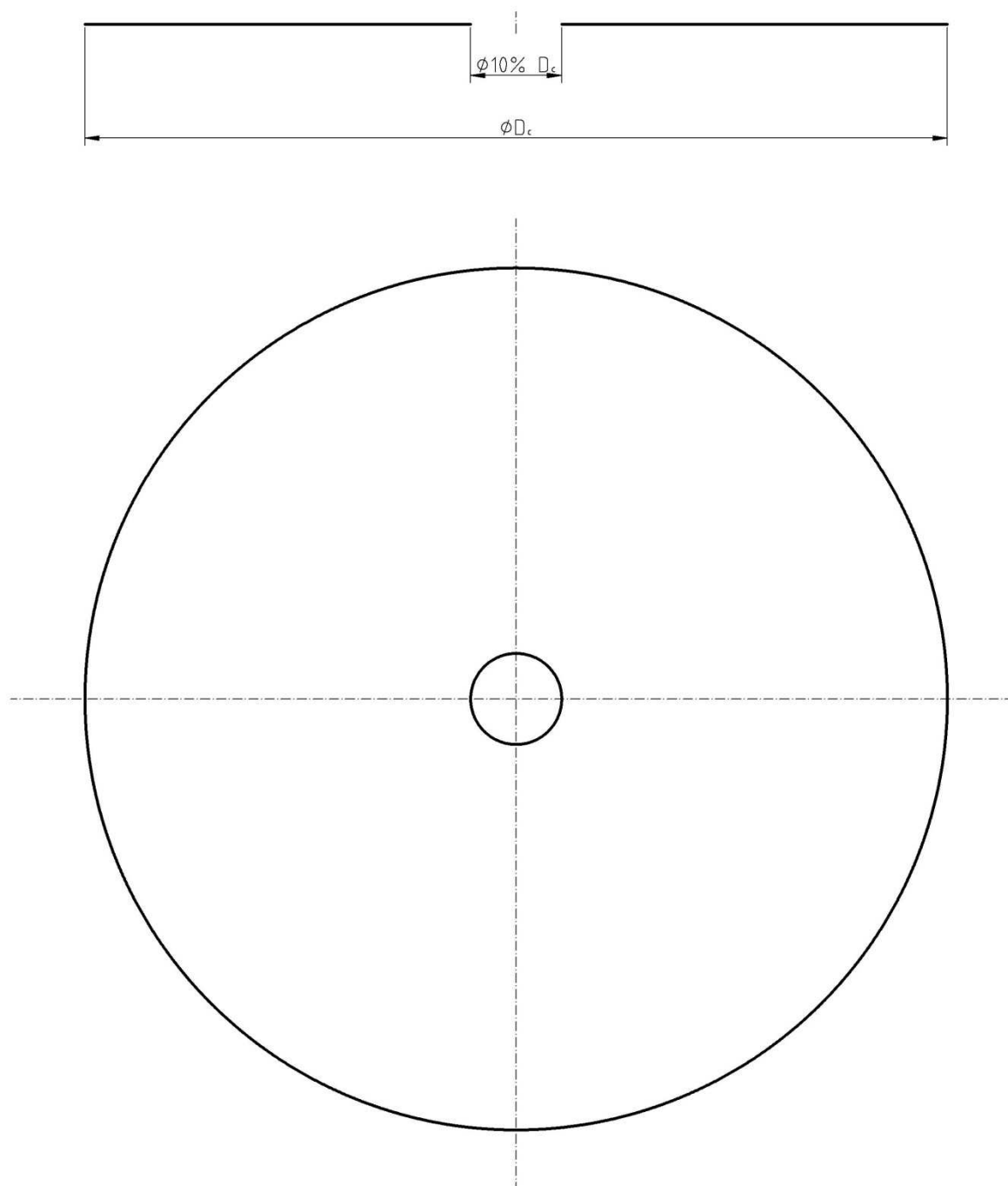
---

## Seznam příloh

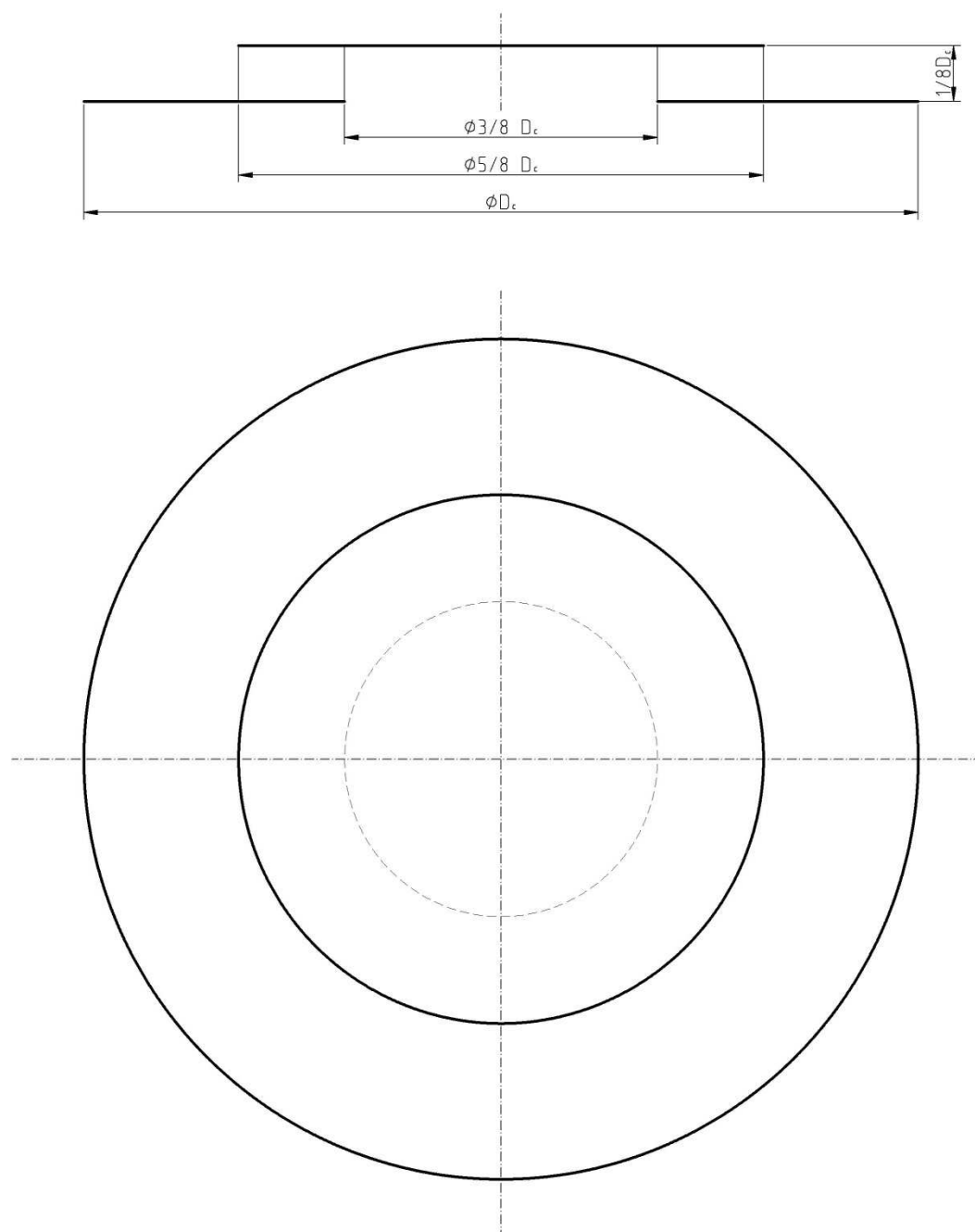
Příloha č.1 Schémata modelů vrchlíků	121
Příloha č.2 Tabulky geometrických parametrů padáků [30]	123
Příloha č.3 Konstrukce modelu padáku pro zkoušky dělitelného slideru	125
Příloha č.4 Balení padáku pro shozové zkoušky	129
Příloha č.5 Seznam nejznámějších výrobců PZS	133
Příloha č.6 Odvození času otevření pro $\eta=0$ , $n_p=0,5$	135
Příloha č.7 Odvození času otevření pro $\eta\neq 0$ , $n_p=0,5$	138
Příloha č.8 Odvození času otevření pro $\eta\neq 0$ , $n_p\neq 0,5$	141
Příloha č.9 Odvození součinitele dynamického rázu pro $\eta\neq 0$ , $n_p=0,5$	140
Příloha č.10 Výpočet modelů padáku software Mathcad	143



**Příloha č.1 Schémata modelů vrchlíků**



Obr. 1 Plochý kruhový vrchlík s pólovým otvorem.



Obr. 2 Upravený vrchlík.

## Příloha č.2 Tabulky geometrických parametrů padáků [30]

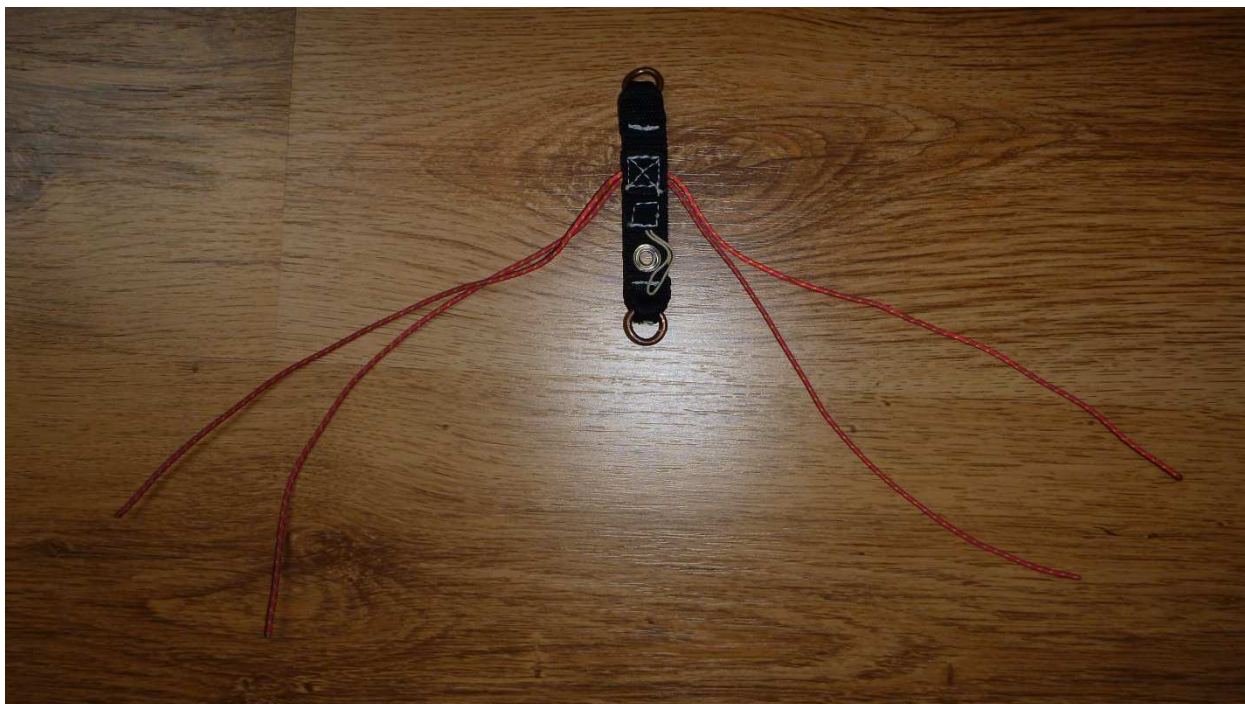
Parachute Type	No. of Gores	Suspension Line Length inches	Velocity		Scale Factor, K			N — a	Axes Ratio			Volume in <sup>3</sup>			V <sub>H</sub> V <sub>R</sub>
			mph	fps	2a D <sub>O</sub>	2a D <sub>F</sub>	2a D <sub>R</sub>		2a L	b a	b' a	b + b' a	V <sub>H</sub>	V <sub>C</sub>	
Flat Circular	12	34	50	73	.645	.650		.856	.6115	.8817	1.4932	4476	4481	6980	1.56
	16	34	50	73	.663	.669		.820	.5558	.9039	1.4597	4450	4100	7325	1.65
10% Extended Skirt	12	34	100	147	.663	.652		.881	.6424	.8860	1.5284	3928	4400	6783	1.73
	16	34	17	25	.654	.640		.785	.5580	.8502	1.4082	4051	3920	6197	1.53
Elliptical	12	34	75	110			.916	.812	.5626	.9657	1.5283		3322	5405	
	16	34	17	25			.875	.800	.6169	.9163	1.4332		2726	4405	
Hemispherical	12	34	125	183			.996	1.254	1.0005	.9080	1.9085		6224	8666	
	16	34	75	110			.894	1.185	.9129	.9380	1.8509		5921	8370	
Ringslot 16% Geometric Porosity	12	34	25	37	.607	.654		.853	.6566	.8735	1.530	3800	3650	5903	1.55
	12	34	100	147	.616	.663		.922	.6566	.8735	1.530	3800	4198	8166	1.62
	12	34	200	293	.637	.686		.918	.6566	.8735	1.530	3800	4624	6826	1.90
	16	34	25	37	.611	.658		.827	.6004	.8890	1.4894	3800	3673	5685	1.50
	16	34	100	147	.617	.664		.864	.6004	.8890	1.4894	3800	3985	6030	1.59
	16	34	200	293	.645	.695		.844	.6004	.8890	1.4894	3800	4430	6897	1.82
Ribbon 24% Geometric Porosity	12	34	25	37	.586	.632		.859	.6558	.8768	1.5326	3800	3323	5335	1.40
	12	34	100	147	.615	.663		.837	.6558	.8768	1.5326	3800	3714	6163	1.62
	12	34	200	293	.632	.681		.877	.6558	.8768	1.5326	3800	4280	6683	1.76
	16	34	25	37	.603	.650		.797	.5570	.8578	1.4148	3800	3438	5358	1.41
	16	34	100	147	.626	.674		.791	.5570	.8578	1.4148	3800	3804	5983	1.57
	16	34	200	293	.648	.698		.781	.5570	.8578	1.4148	3800	4164	6656	1.75
Cross Chute w/L = .264	12	34	25	37	.710		.543	1.242	.8867	1.2776	2.1643	1928	3768	5798	3.01
	12	34	100	147	.707		.540	1.270	.8867	1.2776	2.1643	1928	3810	5712	2.96
	12	34	200	293	.716		.547	1.285	.8867	1.2776	2.1643	1928	4212	5925	3.07
	16	47	25	37	.759		.580	1.113	.8494	1.2512	2.1006	1928	4052	6868	3.56
	16	47	100	147	.729		.557	1.205	.8494	1.2512	2.1006	1928	3973	5958	3.09
	16	47	200	293	.775		.582	1.110	.8494	1.2512	2.1006	1928	4292	7303	3.79

Parachute Type	No. of Gores	Suspension Line Length inches	Velocity mph fps	Scale Factor, $K = \frac{2\bar{a}}{D_o} \cdot \frac{2\bar{a}}{D_f}$	$\frac{N}{\bar{a}}$	Axes Ratio $\frac{b}{\bar{a}}, \frac{b'}{\bar{a}}, \frac{b+b'}{\bar{a}}$	Volume in <sup>3</sup> $V_H, V_C, V_O$	$\frac{V_O}{V_H}$
Flat Circular*	24	34	50	.677	.795	.5758 .8126 1.3884	4362 4695 7273	1.67
	30	34	17 25	.668	.827	.6214 .7806 1.4020	4342 4626 7027	1.62
10% Extended* Skirt	24	34	100	.665	.834	.5949 .8771 1.4720	4138 4446 6930	1.67
	30	34	17 25	.650	.825	.6255 .7962 1.4127	4172 4076 6265	1.50
Ring Slot 16% Geometrically Porous	24	34	25	.663	.824	.5800 .9053 1.4853	3591 3878 6031	1.68
	24	34	100	.680	.819	.5800 .9053 1.4853	3591 4079 6510	1.81
	24	34	200	.694	.809	.5800 .9053 1.4853	3591 4270 6924	1.93
	30	34	25	.677	.788	.5800 .9053 1.4853	3582 3826 6404	1.79
	30	34	100	.684	.802	.5800 .9053 1.4853	3582 4023 6588	1.84
	30	34	200	.698	.800	.5800 .9053 1.4853	3582 4260 7012	1.96
Ribbon 24% Geometrically Porous	24	34	25	.671	.770	.5980 .8187 1.4167	3591 3591 5968	1.66
	24	34	100	.676	.813	.5980 .8187 1.4167	3591 3927 6097	1.70
	24	34	200	.687	.804	.5980 .8187 1.4167	3591 4061 6389	1.78
	30	34	25	.655	.782	.6021 .8463 1.4484	3582 3396 5666	1.58
	30	34	100	.669	.784	.6021 .8463 1.4484	3582 3622 6022	1.68
	30	34	200	.677	.823	.6021 .8463 1.4484	3582 4002 6256	1.75

### ***Příloha č.3 Konstrukce modelu padáku pro zkoušky dělitelného slideru***

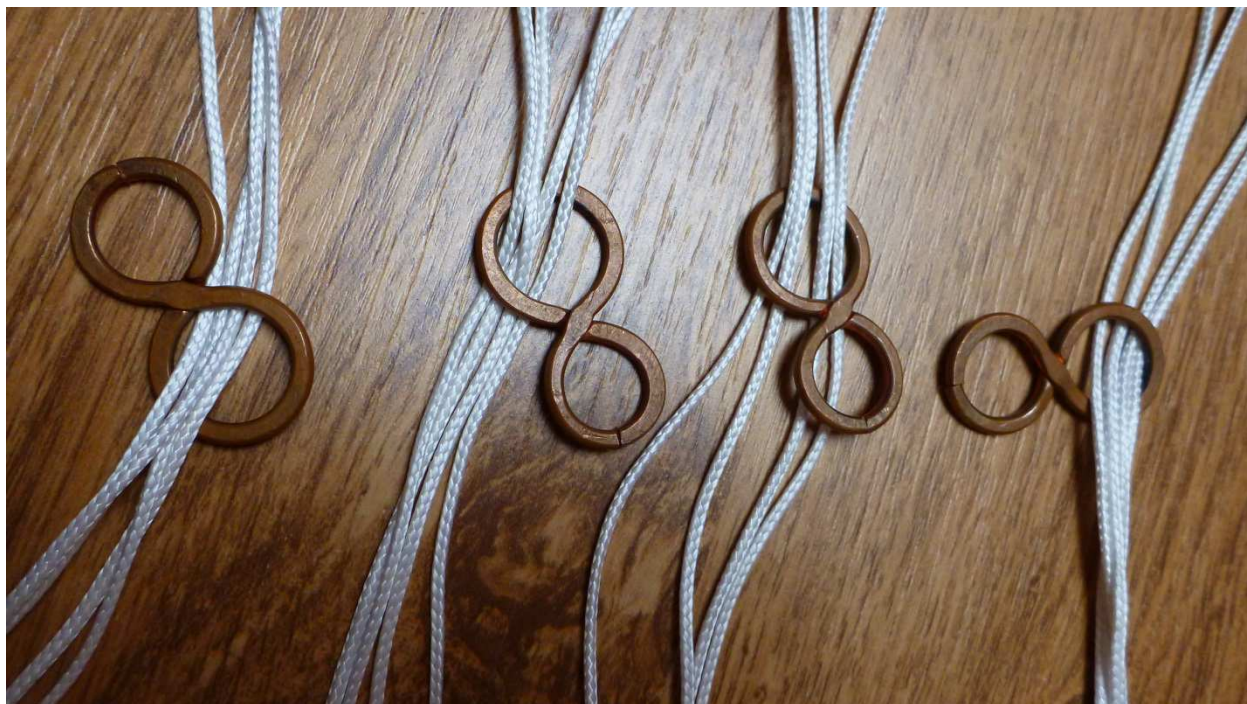


Obr. 3 Model dělitelného slideru.

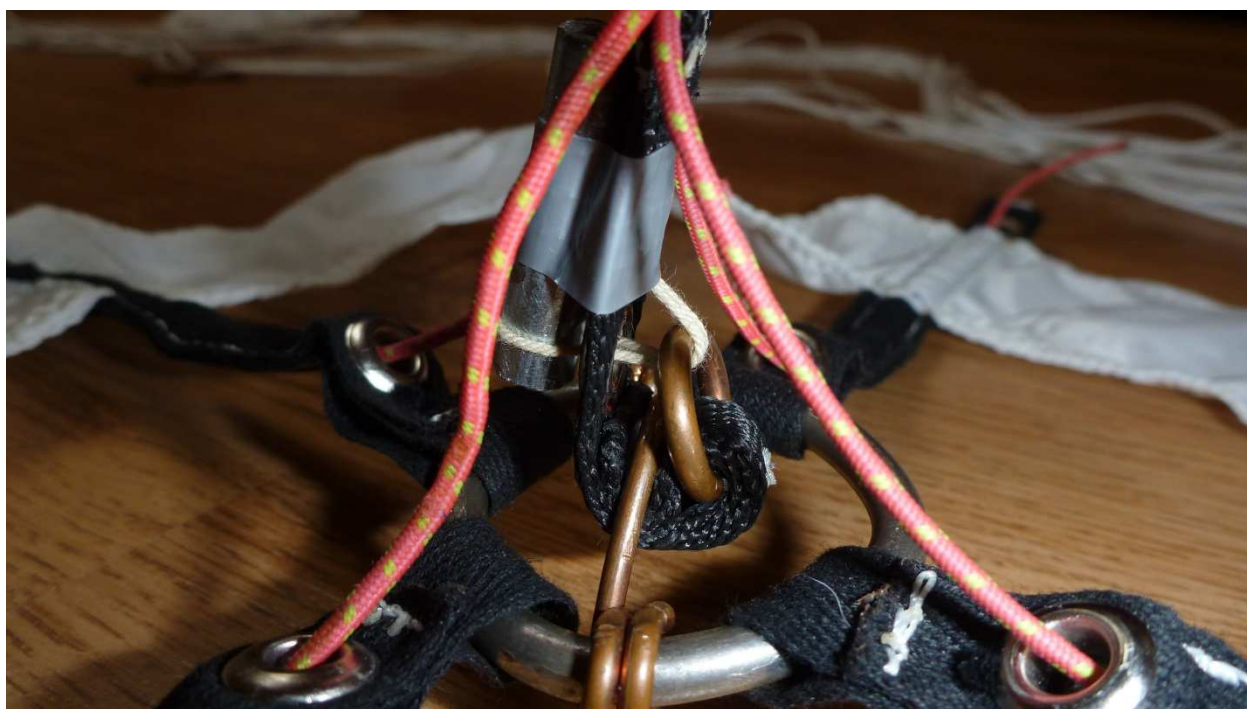


Obr. 4 Model centrálního volného konce.





Obr. 5 Kovové průchodky slideru.



Obr. 6 Sestavená centrální část dělitelného slideru.





Obr. 7 Napojení nosné šňůry k vrchlíku padáku, s plastovým dorazem.



Obr. 8 Vrchol vrchlíku se závěsným okem a průchodkou pro pomocnou šňůru.



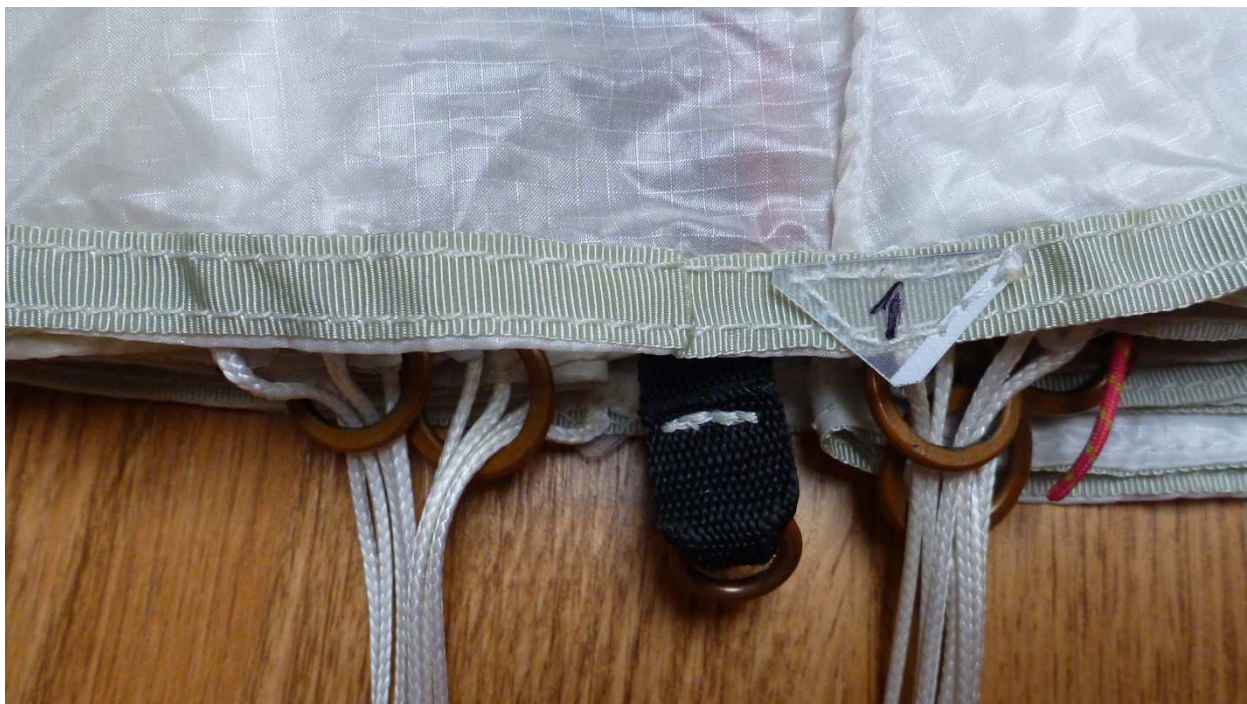
Obr. 9 Kontejner vrchlíku padáku.



### ***Příloha č.4 Balení padáku pro shozové zkoušky***

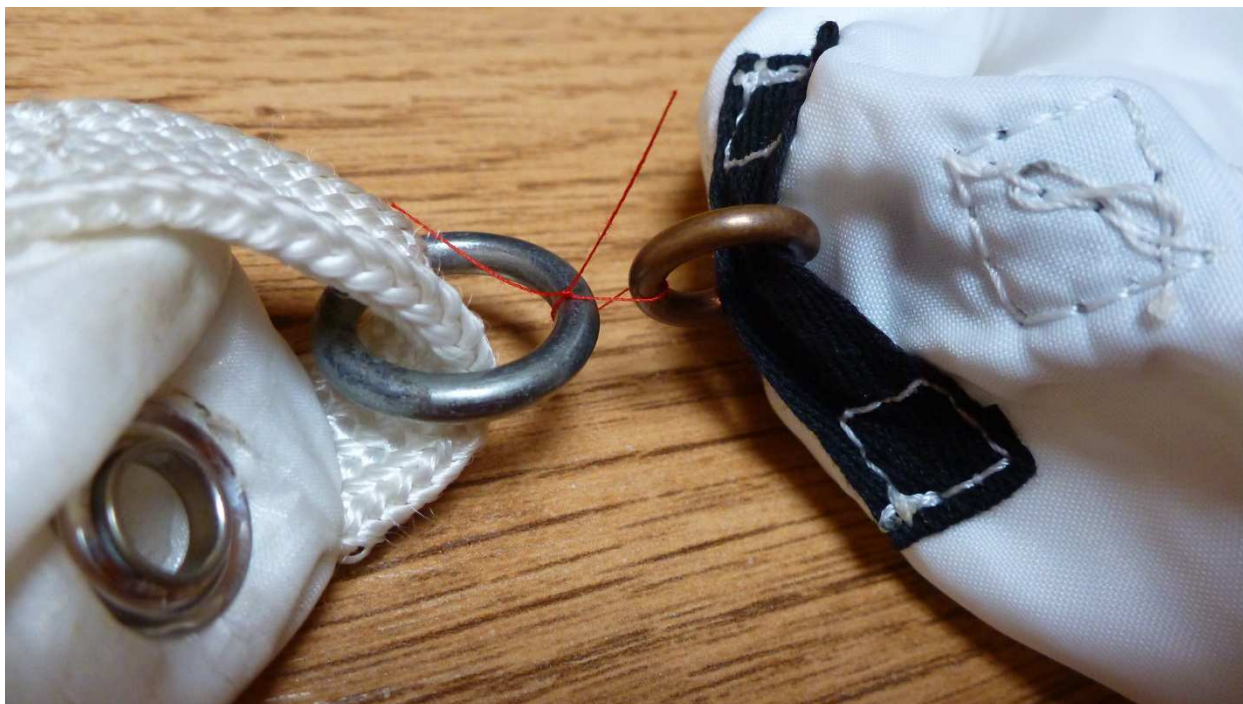


Obr. 10 Nalistování vrchlíku padáku.



Obr. 11 Umístění dělitelného slideru na dorazech vrchlíku.





Obr. 12 Spojení vrcholu vrchlíku padáku s kontejnerem trhací šňůrkou.



Obr. 13 Přeložení vrchlíku padáku „na třetiny“.





Obr. 14 Poskládání vrchlíku padáku „do pyramidy“.



Obr. 15 Uložení vrchlíku padáku v kontejneru vrchlíku.





Obr. 16 Uložení vrchlíku padáku a spojení centrálního volného konce s kontejnerem vrchlíku trhací šňůrkou.



Obr. 17 Uložení nosných šňůr vrchlíku.

---

## ***Příloha č.5 Seznam nejznámějších výrobců PZS***

### **Ballistic Recovery Systems, Inc. (USA)**

- výroba balistických záchranných padáků od roku 1982
- největší světový výrobce
- 312 zachráněných osob (24.8.2014)
- široká škála modelových řad pro různé hmotnosti i rychlosti letu
- pro mnoho letounů Cirrus a Cessna certifikace na zástavbu od FAA i EASA

### **Galaxy High Technology, s.r.o. (ČR)**

- výroba balistických záchranných padáků od roku 1984
- druhý největší světový výrobce
- široká škála modelových řad pro různé hmotnosti i rychlosti letu

### **Stratos 07, s.r.o. (ČR)**

- výroba balistických záchranných padáků od roku 1999
- základní modelové řady až do hmotnosti 2020kg

### **U.S.H. - výroba záchranných systémů, s.r.o. (ČR)**

- výroba balistických záchranných padáků od roku 1994
- modelové řady pro hmotnosti 80 až 520kg a rychlosti letu 45 až 300km/h

### **Parasport, c.i.p. S.L. (Španělsko)**

- původně servisní středisko americké Ballistic Recovery Systems, Inc. a Second Chantz
- výroba vlastních balistických záchranných soustav od roku 2000

### **MVEN (RUS)**

- výroba balistických záchranných padáků od roku 1990
- dva druhy záchranných soustav pro MTOW do 500kg
- EASA povolení zástavby pro kluzáky Ventus a Discus

---

### **Second Chantz, LLC (USA)**

- zakladatel Steve Lantz v roce 1982
- velmi oblíbené záchranné soustavy od roku 1982 do roku 1996 - v tomto období prodáno přes 7tis. záchranných soustav a zachráněno přes 70 osob
- nyní po 15-ti leté pauze přicházejí na trh s novou soustavou, která místo rakety na tuhé palivo používá raketu na stlačený dusík.

### **Advanced Air Sports Products, Inc. (USA)**

- později Handbury Products Corp.
- ještě později Free Flight Enterprises
- výrobou nejrůznějších padáků se zabývá dodnes

### **GQ Parachutes, Ltd. (UK)**

- výrobou balistických záchranných soustav se společnost zabývala jen krátce
- konstrukci raketnice a rakety prodali společnosti Ballistic Recovery Systems, Inc.

### **Pioneer Aerospace**

- založena v roce 1983
- se záchrannými padáky experimentuje pouze na počátku své existence
- v dnešní době se věnuje výrobě vojenských padáků (T-10), cargo padáků a padáků pro NASA

### **GQ Security**

- založena v roce 1983
- se záchrannými padáky experimentuje pouze na počátku své existence
- v dnešní době vyrábí celou řadu vojenských a cargo padáků

### **Advanced Ballistic Chutes**

- založena 1983
- se svojí záchrannou soustavou se neprosadili a zanikli

## Příloha č. 6 Odvození času otevření $t_0$ pro $\eta=0$ , $n_p=0.5$

Vyjádření rychlosti  $V$  v závislosti na  $V_s$ :

$$\int_{V_s}^V \frac{1}{V^2} dV = \frac{\frac{1}{t_0} \int_0^t \left(\frac{t}{t_0}\right)^6 dt}{-M \cdot V_s}$$

Integrace za podmínky  $(0 \geq V \vee V_s \geq 0) \wedge V \neq 0 \wedge V_s \neq 0$

$$\frac{V - V_s}{V \cdot V_s} = - \frac{t^7}{7 \cdot M \cdot t_0^7 \cdot V_s}$$

$$\frac{1}{V_s} - \frac{1}{V} = - \frac{t^7}{7 \cdot M \cdot t_0^7 \cdot V_s}$$

$$V = \frac{7 \cdot M \cdot t_0^7 \cdot V_s}{t^7 + 7 \cdot M \cdot t_0^7} = \frac{V_s}{1 + \frac{1}{7 \cdot M} \cdot \left(\frac{t}{t_0}\right)^7}$$

Dosazení za  $V$  do základní rovnice:

$$\Theta_g = A_{M0} \cdot \int_0^t V \cdot \left(\frac{t}{t_0}\right)^6 dt - A_{S0} \cdot k \cdot \left(\frac{1}{2} \cdot c_p \cdot \rho\right)^{\frac{1}{2}} \cdot \int_0^t V \cdot \left(\frac{t}{t_0}\right)^6 dt$$

$$\Theta_g = A_{M0} \cdot \int_0^{t_0} \frac{V_s}{1 + \frac{1}{7 \cdot M} \cdot \left(\frac{t}{t_0}\right)^7} \cdot \left(\frac{t}{t_0}\right)^6 dt - A_{S0} \cdot k \cdot \left(\frac{1}{2} \cdot c_p \cdot \rho\right)^{\frac{1}{2}} \cdot \int_0^{t_0} \frac{V_s}{1 + \frac{1}{7 \cdot M} \cdot \left(\frac{t}{t_0}\right)^7} \cdot \left(\frac{t}{t_0}\right)^6 dt$$

Integrace:

$$\Theta_g = M \cdot t_0 \cdot V_s \cdot A_{M0} \cdot \ln\left(\frac{1}{7 \cdot M} + 1\right) - M \cdot k \cdot t_0 \cdot V_s \cdot A_{S0} \cdot \ln\left(\frac{1}{7 \cdot M} + 1\right) \cdot \sqrt{\frac{\rho \cdot c_p}{2}}$$

$$\text{Dosazení } M = \frac{2 \cdot W}{\rho \cdot g \cdot V_s \cdot t_0 \cdot C_D S_0} :$$

$$\begin{aligned} \Theta_g = & \frac{2 \cdot W}{\rho \cdot g \cdot V_s \cdot t_0 \cdot C_D S_0} \cdot t_0 \cdot V_s \cdot A_{M0} \cdot \ln \left( \frac{1}{7 \cdot \frac{2 \cdot W}{\rho \cdot g \cdot V_s \cdot t_0 \cdot C_D S_0}} + 1 \right) - \frac{2 \cdot W}{\rho \cdot g \cdot V_s \cdot t_0 \cdot C_D S_0} \\ & - \frac{2 \cdot W}{\rho \cdot g \cdot V_s \cdot t_0 \cdot C_D S_0} \cdot k \cdot t_0 \cdot V_s \cdot A_{S0} \cdot \ln \left( \frac{1}{7 \cdot \frac{2 \cdot W}{\rho \cdot g \cdot V_s \cdot t_0 \cdot C_D S_0}} + 1 \right) \cdot \sqrt{\frac{\rho \cdot c_p}{2}} \end{aligned}$$

Úpravy a zjednodušení:

$$\Theta_g = \frac{2 \cdot W \cdot \left( A_{M0} - \frac{k \cdot A_{S0} \cdot \sqrt{2 \cdot \rho \cdot c_p}}{2} \right) \cdot \left( \ln \left( \frac{14 \cdot W + g \cdot \rho \cdot t_0 \cdot V_s \cdot C_D S_0}{W} \right) - \ln(14) \right)}{g \cdot \rho \cdot C_D S_0}$$

$$\Theta_g \cdot g \cdot \rho \cdot C_D S_0 = 2 \cdot W \cdot \left( A_{M0} - \frac{k \cdot A_{S0} \cdot \sqrt{2 \cdot \rho \cdot c_p}}{2} \right) \cdot \left( \ln \left( \frac{14 \cdot W + g \cdot \rho \cdot t_0 \cdot V_s \cdot C_D S_0}{W} \right) - \ln(14) \right)$$

$$g \cdot \rho \cdot \Theta_g \cdot C_D S_0 = 2 \cdot W \cdot \ln \left( \frac{14 \cdot W + g \cdot \rho \cdot t_0 \cdot V_s \cdot C_D S_0}{14 \cdot W} \right) \cdot \left( A_{M0} - \frac{\sqrt{2} \cdot k \cdot A_{S0} \cdot \sqrt{\rho \cdot c_p}}{2} \right)$$

$$\ln \left( \frac{14 \cdot W + g \cdot \rho \cdot t_0 \cdot V_s \cdot C_D S_0}{14 \cdot W} \right) = \frac{g \cdot \rho \cdot \Theta_g \cdot C_D S_0}{2 \cdot W \cdot \left( A_{M0} - \frac{\sqrt{2} \cdot k \cdot A_{S0} \cdot \sqrt{\rho \cdot c_p}}{2} \right)}$$

$$\ln \left( \frac{g \cdot \rho \cdot t_0 \cdot V_s \cdot C_D S_0}{W} + 14 \right) - \ln(14) = \frac{g \cdot \rho \cdot \Theta_g \cdot C_D S_0}{2 \cdot W \cdot A_{M0} - W \cdot k \cdot A_{S0} \cdot \sqrt{2 \cdot \rho \cdot c_p}}$$

$$\ln \left( t_0 \cdot \frac{g \cdot \rho \cdot V_s \cdot C_D S_0}{W} + 14 \right) = \frac{g \cdot \rho \cdot \Theta_g \cdot C_D S_0}{2 \cdot W \cdot A_{M0} - W \cdot k \cdot A_{S0} \cdot \sqrt{2 \cdot \rho \cdot c_p}} + \ln(14)$$

Odlogaritmování:

$$e^{\left( \frac{g \cdot \rho \cdot \Theta_g \cdot C_D S_0}{2 \cdot W \cdot A_{M0} - W \cdot k \cdot A_{S0} \cdot \sqrt{2 \cdot \rho \cdot c_p}} + \ln(14) \right)} = t_0 \cdot \frac{g \cdot \rho \cdot V_s \cdot C_D S_0}{W} + 14$$



$$t_0 = \frac{\left( e^{\left( \frac{g \cdot \rho \cdot \Theta_g \cdot C_D S_0}{2 \cdot W \cdot A_{M0} - W \cdot k \cdot A_{S0} \cdot \sqrt{2 \cdot \rho \cdot c_p}} + \ln(14) \right)} - 14 \right)}{\frac{g \cdot \rho \cdot V_s \cdot C_D S_0}{W}}$$

$$t_0 = \frac{14 \cdot W \cdot \left( e^{\left( \frac{g \cdot \rho \cdot \Theta_g \cdot C_D S_0}{2 \cdot W \cdot A_{M0} - W \cdot k \cdot A_{S0} \cdot \sqrt{2 \cdot \rho \cdot c_p}} - 1 \right)} - 1 \right)}{g \cdot \rho \cdot V_s \cdot C_D S_0}$$

Výsledek:

$$t_0 = \frac{14 \cdot W}{g \cdot \rho \cdot V_s \cdot C_D S_0} \cdot \left( e^{\left( \frac{g \cdot \rho \cdot \Theta_g \cdot C_D S_0}{2 \cdot W \cdot A_{M0} - W \cdot k \cdot A_{S0} \cdot \sqrt{2 \cdot \rho \cdot c_p}} - 1 \right)} - 1 \right)$$

## Příloha č. 7 Odvození času otevření $t_0$ pro $\eta \neq 0$ , $n_p = 0.5$

Vyjádření rychlosti  $V$  v závislosti na  $V_s$ :

$$\int_{V_s}^V \frac{1}{V^2} dV = \frac{\frac{1}{t_0} \int_0^t \left( (1-\eta) \cdot \left( \frac{t}{t_0} \right)^3 + \eta \right)^2 dt}{-M \cdot V_s}$$

Integrace za podmínky  $(0 \geq V \vee V_s \geq 0) \wedge V \neq 0 \wedge V_s \neq 0$

$$\frac{V - V_s}{V \cdot V_s} = - \frac{t \cdot \eta^2 + \frac{t^7 \cdot (\eta - 1)^2}{7 \cdot t_0^6} - \frac{t^4 \cdot \eta \cdot (\eta - 1)}{2 \cdot t_0^3}}{M \cdot t_0 \cdot V_s}$$

$$\frac{1}{V_s} - \frac{1}{V} = - \frac{t \cdot \eta^2 + \frac{t^7 \cdot (\eta - 1)^2}{7 \cdot t_0^6} - \frac{t^4 \cdot \eta \cdot (\eta - 1)}{2 \cdot t_0^3}}{M \cdot t_0 \cdot V_s}$$

$$V = \frac{1}{\frac{1}{V_s} + \frac{t \cdot \eta^2 + \frac{t^7 \cdot (\eta - 1)^2}{7 \cdot t_0^6} - \frac{t^4 \cdot \eta \cdot (\eta - 1)}{2 \cdot t_0^3}}{M \cdot t_0 \cdot V_s}}$$

Dosazení za  $V$  do základní rovnice:

$$\Theta_g = A_{M0} \cdot \int_0^{t_0} V \cdot \left( (1-\eta) \cdot \left( \frac{t}{t_0} \right)^3 + \eta \right)^2 dt - A_{S0} \cdot k \cdot \left( \frac{1}{2} \cdot c_p \cdot \rho \right)^{\frac{1}{2}} \cdot \int_0^{t_0} V \cdot \left( (1-\eta) \cdot \left( \frac{t}{t_0} \right)^3 + \eta \right)^2 dt$$

$$\Theta_g = A_{M0} \cdot \int_0^{t_0} \left( \frac{1}{\frac{1}{V_s} + \frac{t \cdot \eta^2 + \frac{t^7 \cdot (\eta - 1)^2}{7 \cdot t_0^6} - \frac{t^4 \cdot \eta \cdot (\eta - 1)}{2 \cdot t_0^3}}{M \cdot t_0 \cdot V_s}} \right) \cdot \left( (1-\eta) \cdot \left( \frac{t}{t_0} \right)^3 + \eta \right)^2 dt - \dots$$

$$-A_{S0} \cdot k \cdot \left( \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot c_p \right)^{\frac{1}{2}} \cdot \int_0^{t_0} \left( \frac{1}{\frac{1}{V_s} + \frac{t \cdot \eta^2 + \frac{t^7 \cdot (\eta-1)^2}{7 \cdot t_0^6} - \frac{t^4 \cdot \eta \cdot (\eta-1)}{2 \cdot t_0^3}}}{M \cdot t_0 \cdot V_s} \right) \cdot \left( (1-\eta) \cdot \left( \frac{t}{t_0} \right)^3 + \eta \right)^2 dt$$

Integrace:

$$\Theta = A_{M0} \cdot \left( M \cdot t_0 \cdot V_s \cdot \ln \left( \frac{14 \cdot M \cdot t_0^7 + 3 \cdot \eta \cdot t_0^7 + 2 \cdot t_0^7 + 9 \cdot \eta^2 \cdot t_0^7}{2 \cdot \eta^2 - 4 \cdot \eta + 2} \right) - M \cdot t_0 \cdot V_s \cdot \ln \left( \frac{14 \cdot M \cdot t_0^7}{2 \cdot \eta^2 - 4 \cdot \eta + 2} \right) \right) - \dots$$

$$- k \cdot A_{S0} \cdot \left( M \cdot t_0 \cdot V_s \cdot \ln \left( \frac{14 \cdot M \cdot t_0^7 + 3 \cdot \eta \cdot t_0^7 + 2 \cdot t_0^7 + 9 \cdot \eta^2 \cdot t_0^7}{2 \cdot \eta^2 - 4 \cdot \eta + 2} \right) - M \cdot t_0 \cdot V_s \cdot \ln \left( \frac{14 \cdot M \cdot t_0^7}{2 \cdot \eta^2 - 4 \cdot \eta + 2} \right) \right) \cdot \sqrt{\frac{\rho \cdot c_p}{2}}$$

Úprava:

$$\Theta = - \left( M \cdot t_0 \cdot V_s \cdot \left( A_{M0} - \frac{\sqrt{2} \cdot k \cdot A_{S0} \cdot \sqrt{\rho \cdot c_p}}{2} \right) \cdot \left( \ln \left( \frac{M \cdot t_0^7}{2 \cdot \eta^2 - 4 \cdot \eta + 2} \right) - \ln \left( \frac{t_0^7}{28 \cdot \eta^2 - 56 \cdot \eta + 28} \cdot (9 \cdot \eta^2 + 3 \cdot \eta + 14 \cdot M + 2) \right) \right) \right)$$

-  $t_0$  nelze vyjádřit explicitně - numerické řešení  $t_0$

## Příloha č. 8 Odvození času otevření $t_0$ pro $\eta \neq 0$ , $n_p \neq 0.5$

Použitím vztahu pro vyjádření rychlosti (viz Příloha 7):

$$V = \frac{1}{\frac{t \cdot \eta^2 + \frac{t^7 \cdot (\eta - 1)^2}{7 \cdot t_0^6} - \frac{t^4 \cdot \eta \cdot (\eta - 1)}{2 \cdot t_0^3}}{\frac{1}{V_s} + \frac{M \cdot t_0 \cdot V_s}}}$$

Základní rovnice:

$$\Theta_g = A_{M0} \cdot \int_0^{t_0} V \cdot \left( (1 - \eta) \cdot \left( \frac{t}{t_0} \right)^3 + \eta \right)^2 dt - A_{S0} \cdot k \cdot \left( \frac{1}{2} \cdot c_p \cdot \rho \right)^{n_p} \cdot \int_0^{t_0} V^{n_p} \cdot \left( (1 - \eta) \cdot \left( \frac{t}{t_0} \right)^3 + \eta \right)^2 dt$$

Dosazením  $V$ :

$$\begin{aligned} \Theta_g = A_{M0} \cdot \int_0^{t_0} & \left( \frac{1}{\frac{t \cdot \eta^2 + \frac{t^7 \cdot (\eta - 1)^2}{7 \cdot t_0^6} - \frac{t^4 \cdot \eta \cdot (\eta - 1)}{2 \cdot t_0^3}}{\frac{1}{V_s} + \frac{M \cdot t_0 \cdot V_s}}} \right) \cdot \left( (1 - \eta) \cdot \left( \frac{t}{t_0} \right)^3 + \eta \right)^2 dt - \dots \\ & - A_{S0} \cdot k \cdot \left( \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot c_p \right)^{n_p} \cdot \int_0^{t_0} \left( \frac{1}{\frac{t \cdot \eta^2 + \frac{t^7 \cdot (\eta - 1)^2}{7 \cdot t_0^6} - \frac{t^4 \cdot \eta \cdot (\eta - 1)}{2 \cdot t_0^3}}{\frac{1}{V_s} + \frac{M \cdot t_0 \cdot V_s}}} \right)^{2 n_p} \cdot \left( (1 - \eta) \cdot \left( \frac{t}{t_0} \right)^3 + \eta \right)^2 dt \end{aligned}$$

V tomto výrazu nastává problém s řešením druhé části, resp. integrálu závorky umocněné na  $2 n_p$ . Druhou část lze upravit do podoby:

$$\int_0^{t_0} k \cdot A_{S0} \cdot \left( \eta - \frac{t^3 \cdot (\eta - 1)}{t_0^3} \right)^2 \cdot \left( \frac{98 \cdot M^2 \cdot \rho \cdot t_0^{14} \cdot c_p^2 \cdot V_s^2}{\left( 2 \cdot t^7 \cdot \eta^2 - 4 \cdot t^7 \cdot \eta + 2 \cdot t^7 - 7 \cdot t^4 \cdot \eta^2 \cdot t_0^3 + 7 \cdot t^4 \cdot \eta \cdot t_0^3 + 14 \cdot t \cdot \eta^2 \cdot t_0^6 + 14 \cdot M \cdot t_0^7 \right)^2} \right)^{n_p} dt$$

Pokud je  $n_p$  přirozené, pak jde o obyčejnou racionální funkci, ta se obecně dá integrovat rozkladem na parciální zlomky. K tomu je nutno rozložit polynom ve jmenovateli. To jde udělat přesně pro polynomy stupně nejvýše 4, pro vyšší polynomy toto závisí na daných parametrech.

Mathematický software Mathcad tento integrál vypočítat nedokáže, software Mathematica integrál vypočítá obecně, ovšem s podmínkou velice složitých vstupních parametrů. Pouze požadavek na kladné hodnoty vstupních parametrů problém neřeší.

Výpočet  $t_0$  pro  $\eta \neq 0, n \neq 0.5$  lze provést porovnáním objemů vzduchu - nalezení  $t_0$  při kterém platí  $\Theta_g = \Theta_c$ .

## Příloha č. 9 Odvození součinitele dynamického rázu $x_i$ pro

$$\eta \neq 0, n_p = 0.5$$

Z odvozeného vztahu pro okamžitou rychlost (Příloha č. 7):

$$V = \frac{1}{\frac{1}{V_s} + \frac{t \cdot \eta^2 + \frac{t^7 \cdot (\eta - 1)^2}{7 \cdot t_0^6} - \frac{t^4 \cdot \eta \cdot (\eta - 1)}{2 \cdot t_0^3}}{M \cdot t_0 \cdot V_s}}$$

Úprava:

$$V = \frac{14 \cdot M \cdot t_0^7 \cdot V_s}{2 \cdot t^7 \cdot \eta^2 - 4 \cdot t^7 \cdot \eta + 2 \cdot t^7 - 7 \cdot t^4 \cdot \eta^2 \cdot t_0^3 + 7 \cdot t^4 \cdot \eta \cdot t_0^3 + 14 \cdot t \cdot \eta^2 \cdot t_0^6 + 14 \cdot M \cdot t_0^7}$$

Vyjádření podílu  $\frac{V}{V_s}$ :

$$\frac{V}{V_s} = \frac{14 \cdot M \cdot t_0^7}{2 \cdot t^7 \cdot \eta^2 - 4 \cdot t^7 \cdot \eta + 2 \cdot t^7 - 7 \cdot t^4 \cdot \eta^2 \cdot t_0^3 + 7 \cdot t^4 \cdot \eta \cdot t_0^3 + 14 \cdot t \cdot \eta^2 \cdot t_0^6 + 14 \cdot M \cdot t_0^7}$$

Základní vztahy :

$$x_i = \frac{C_D S}{C_D S_0} \cdot \left( \frac{V}{V_s} \right)^2, \quad \frac{C_D S}{C_D S_0} = \left( (1 - \eta) \cdot \left( \frac{t}{t_0} \right)^3 + \eta \right)^2$$

Dosazení do základních vztahů:

$$x_i = \left( (1 - \eta) \cdot \left( \frac{t}{t_0} \right)^3 + \eta \right)^2 \cdot \frac{14 \cdot M \cdot t_0^7}{2 \cdot t^7 \cdot \eta^2 - 4 \cdot t^7 \cdot \eta + 2 \cdot t^7 - 7 \cdot t^4 \cdot \eta^2 \cdot t_0^3 + 7 \cdot t^4 \cdot \eta \cdot t_0^3 + 14 \cdot t \cdot \eta^2 \cdot t_0^6 + 14 \cdot M \cdot t_0^7}$$

Součinitel dynamického rázu  $x_i$ :

$$x_i(t) = \frac{196 \cdot M^2 \cdot t_0^{14} \cdot \left( \eta - \frac{t^3 \cdot (\eta - 1)}{t_0^3} \right)^2}{\left( 2 \cdot t^7 \cdot \eta^2 - 4 \cdot t^7 \cdot \eta + 2 \cdot t^7 - 7 \cdot t^4 \cdot \eta^2 \cdot t_0^3 + 7 \cdot t^4 \cdot \eta \cdot t_0^3 + 14 \cdot t \cdot \eta^2 \cdot t_0^6 + 14 \cdot M \cdot t_0^7 \right)^2}$$

## Příloha č. 10 Výpočet modelů padáku, software Mathcad:

Výpočet času otevření a průběhu dynamického rázu zkoušeného modelu padáku pro porovnání se čtvrtou sadou zkoušek (dt\_04\_slud\_pd\_xx), tzn. dělitelný slider se v průběhu otevírání rozdělí.

Poznámky k výpočtu:

- výpočet je prováděn pro rešeršně zjištěné hodnoty propustnosti tkaniny,
- výpočet je prováděn pro rešeršně zjištěné hodnoty geometrických charakteristik vrchlíku nutných pro výpočet objemu vzduchu pojmutého vrchlíkem,
- v literatuře např. [30] je uváděno, že rychlost  $V_s$  je rychlost v okamžiku natažení nosných šňůr a látky vrchlíku, toto ovšem platí při použití vaku vrchlíku, při použití kontejneru vrchlíku se vrchlík začíná plnit již od natažení nosných šňůr, tedy  $V_s$  rychlost v okamžiku natažení nosných šňůr vrchlíku
- značení proměnných je stejné jako v dizertční práci, pouze pro rozlišení jednotlivé metody je do dolního indexu proměnných přidáno další značení
- tento zápis je přímo aktivním programem software Mathcad který má svou specifickou syntaxi, proto nemohlo být striktně dodrženo formátování a značení zavedené v dizertační práci (např. tečka jako oddělovník desetinných míst, atd.)

### VSTUPNÍ DATA:

- plochý, kruhový, celolátkový vrchlík bez pólového otvoru
- počet nosných šňůr/polí vrchlíku 16, délka nosných šňůr rovna průměru vrchlíku
- materiál vrchlíku tkanina ripstop nylon "F111"

### Vlastnosti prostředí

---

Tíhové zrychlení [ $m \cdot s^{-2}$ ]  $g := 9.81$

Hustota vzduchu [ $kg \cdot m^{-3}$ ]  $\rho := 1.121$

### Vlastnosti soustavy

---

Hmotnost soustavy [ $kg$ ]  $m := 1$

Tíhová síla [ $N$ ]  $W := m \cdot g = 9.81$

Vzdálenost volného pádu podvěšeného tělesa (do natažení nosných šňůr) [ $m$ ]  $h_s := 1.46$

Rychlost soustavy v okamžiku počátku plnění vrchlíku [ $m \cdot s^{-1}$ ]

$$V_s := \sqrt{2 \cdot g \cdot h_s} = 5.352$$

### Vlastnosti vrchlíku padáku

---

Průměr vrchlíku padáku [ $m$ ]

$$D_0 := 1.66$$

Plocha vrchlíku padáku [ $m^2$ ]

$$S_0 := \frac{\pi \cdot D_0^2}{4} = 2.164$$

Součinitel odporu vrchlíku [1], volen dle [30]

$$C_D := 0.75$$

Odporová plocha vrchlíku [ $m^2$ ]

$$C_D S_0 := C_D \cdot S_0 = 1.623$$

Tlakový součinitel [1], volen dle [30]

$$c_p := 1.7$$

### Vlastnosti tkaniny vrchlíku

---

Koeficient propustnosti [ $m^{\frac{3}{2}} \cdot kg^{-\frac{1}{2}}$ ]

$$k := 0.0644$$

Exponent propustnosti [1]

$$n_p := 0.5$$

Tlaková plocha v ustáleném klesání [ $m^2$ ]

$$A_{S0} := S_0 = 2.164$$



**Určení objemu vzduchu pojmutého vrchlíkem** (tabulka geometrických parametrů převzata z [30])

**TABLE I SUMMARY OF PARACHUTE SHAPE TEST RESULTS  
FOR 12-GORE AMD 16-GORE CONFIGURATIONS**

Parachute Type	No. of Gores	Suspension Line Length inches	Velocity		Scale Factor, K				$\frac{N}{a}$	Axes Ratio				Volume in <sup>3</sup>			$\frac{V_o}{V_H}$
			mph	fps	$\frac{2\bar{a}}{D_o}$	$\frac{2\bar{a}}{D_F}$	$\frac{2\bar{a}}{D_R}$	$\frac{2\bar{a}}{L}$		$\frac{b}{a}$	$\frac{b'}{a}$	$\frac{b}{a} + \frac{b'}{a}$		V <sub>H</sub>	V <sub>C</sub>	V <sub>o</sub>	
Flat Circular	12	34	50	73	.645	.650			.856	.6115	.8817	1.4932		4476	4481	6980	1.56
	16	34	50	73	.663	.669			.820	.5558	.9039	1.4597		4450	4100	7325	1.65
10% Extended Skirt	12	34	100	147	.663	.652			.881	.6424	.8860	1.5284		3928	4400	6783	1.73
	16	34	17	25	.654	.640			.785	.5580	.8502	1.4082		4051	3920	6197	1.53
Elliptical	12	34	75	110			.916		.812	.5626	.9657	1.5283			3322	5405	
	16	34	17	25			.875		.800	.6169	.8163	1.4332			2726	4405	
Hemispherical	12	34	125	183			.996		1.254	1.0005	.9080	1.9085			6224	8666	
	16	34	75	110			.994		1.185	.9129	.9380	1.8509			5921	8370	
Ringslot 16% Geometric Porosity	12	34	25	37	.607	.654			.853	.6566	.8735	1.530		3800	3650	5903	1.55
	12	34	100	147	.616	.663			.922	.6566	.8735	1.530		3800	4198	6166	1.62
	12	34	200	293	.637	.686			.918	.6566	.8735	1.530		3800	4624	6826	1.90
	16	34	25	37	.611	.658			.827	.6004	.8890	1.4894		3800	3763	5685	1.50
	16	34	100	147	.617	.664			.864	.6004	.8890	1.4894		3800	3985	6030	1.59
	16	34	200	293	.645	.695			.844	.6004	.8890	1.4894		3800	4430	6897	1.82
Ribbon 24% Geometric Porosity	12	34	25	37	.586	.632			.859	.6558	.8768	1.5326		3800	3323	5335	1.40
	12	34	100	147	.615	.663			.837	.6558	.8768	1.5326		3800	3714	6163	1.62
	12	34	200	293	.632	.681			.877	.6558	.8768	1.5326		3800	4280	6683	1.76
	16	34	25	37	.603	.650			.797	.5570	.8578	1.4148		3800	3438	5358	1.41
	16	34	100	147	.626	.674			.791	.5570	.8578	1.4148		3800	3804	5983	1.57
	16	34	200	293	.648	.698			.781	.5570	.8578	1.4148		3800	4164	6656	1.75
Cross Chute w/L = .264		34	25	37	.710			.543	1.242	.8867	1.2776	2.1643		1928	3768	5798	3.01
		34	100	147	.707			.540	1.270	.8867	1.2776	2.1643		1928	3810	5712	2.96
		34	200	293	.716			.547	1.285	.8867	1.2776	2.1643		1928	4212	5925	3.07
		47	25	37	.759			.580	1.113	.8494	1.2512	2.1006		1928	4052	6868	3.56
		47	100	147	.729			.557	1.205	.8494	1.2512	2.1006		1928	3973	5958	3.09
		47	200	293	.775			.592	1.110	.8494	1.2512	2.1006		1928	4292	7303	3.79

Součinitel zmenšení obtékané plochy vrchlíku [1]	$\frac{2 \bar{a}}{D_0}$	$K_1 := 0.663$
Obtékaný rádius vrchlíku [ <i>m</i> ]	$\bar{a}$	$K_2 := \frac{D_0 \cdot K_1}{2} = 0.55$
Poměry os elipsoidů [1]	$\frac{N}{\bar{a}}$	$K_3 := 0.82$
	$\frac{b}{\bar{a}}$	$K_4 := 0.5558$
	$\frac{b'}{\bar{a}}$	$K_5 := 0.9039$



Obr. 1 Zmenšení odporové  
plochy vrchlíku vlivem  
kovových průchodek slideru

Plocha vstupního hrdla v ustáleném klesání [ $m^2$ ]

$$A_{M0} := \pi \cdot K_2^2 \cdot \left( 1 - \left( \frac{K_3 - K_4}{K_5} \right)^2 \right) = 0.87$$

Zmenšení plochy vstupního hrdla vlivem kovových průchodek slideru o (18%) [ $m^2$ ]

$$A_{M0_o} := A_{M0} \cdot 0.82 = 0.713$$

Ekvivalentní (opravený) poloměr vstupního hrdla [ $m$ ]

$\bar{a}'$

$$K_{2_o} := \sqrt{\frac{A_{M0_o}}{\pi \cdot \left( 1 - \left( \frac{K_3 - K_4}{K_5} \right)^2 \right)}} = 0.498$$

Objem vzduchu pojmutého vrchlíkem [ $m^3$ ]

$$\Theta_g := \frac{2}{3} \cdot \pi \cdot K_2^3 \cdot (K_4 + K_5) = 0.509$$

Ekvivalentní (opravený) objem vzduchu pojmutého vrchlíkem [ $m^3$ ]

$$\Theta_{g_o} := \frac{2}{3} \cdot \pi \cdot K_{2_o}^3 \cdot (K_4 + K_5) = 0.378$$

**Čas otevření padáku vodorovný směr ( $\eta = 0$ ,  $n_p = 0.5$ )**

Čas otevření padáku vodorovný směr [ $s$ ]

$$t_0 := \frac{14 \cdot W}{g \cdot \rho \cdot V_s \cdot C_D S_0} \cdot \left( e^{\frac{g \cdot \rho \cdot \Theta_{g_o} \cdot C_D S_0}{2 \cdot W \cdot A_{M0_o} - W \cdot k \cdot A_{S0} \cdot \sqrt{2 \cdot \rho \cdot c_p}}} - 1 \right) = 1.172$$

## Velikost dynamického rázu ( $\eta = 0$ )

Balistický hmotnostní poměr [1]

$$M := \frac{2 \cdot W}{\rho \cdot g \cdot V_s \cdot t_0 \cdot C_D S_0} = 0.175$$

Okamžitý součinitel dynamického rázu [1]

$$x_i(t) := \frac{49 \cdot M^2 \cdot t^6 \cdot t_0^8}{(t^7 + 7 \cdot M \cdot t_0^7)^2}$$

První derivace rovna nule určí lokální maximum:

$$\frac{d}{dt} x_i(t) = - \frac{98 \cdot M^2 \cdot t^5 \cdot t_0^8 \cdot (4 \cdot t^7 - 21 \cdot M \cdot t_0^7)}{(t^7 + 7 \cdot M \cdot t_0^7)^3}$$

Okamžik maximálního dynamického rázu:

$$t_{x_{imax}} := \left( \frac{21}{4} \cdot M \right)^{\frac{1}{7}} \cdot t_0 = 1.158$$

Součinitel dynamického rázu je největší v okamžiku [s]

$$t_{x_{imax}} := 1.16$$

Maximální součinitel dynamického rázu [1]

$$x_{imax} := \frac{16 \cdot \left( \frac{21 \cdot M}{4} \right)^{\frac{6}{7}}}{49} = 0.304$$

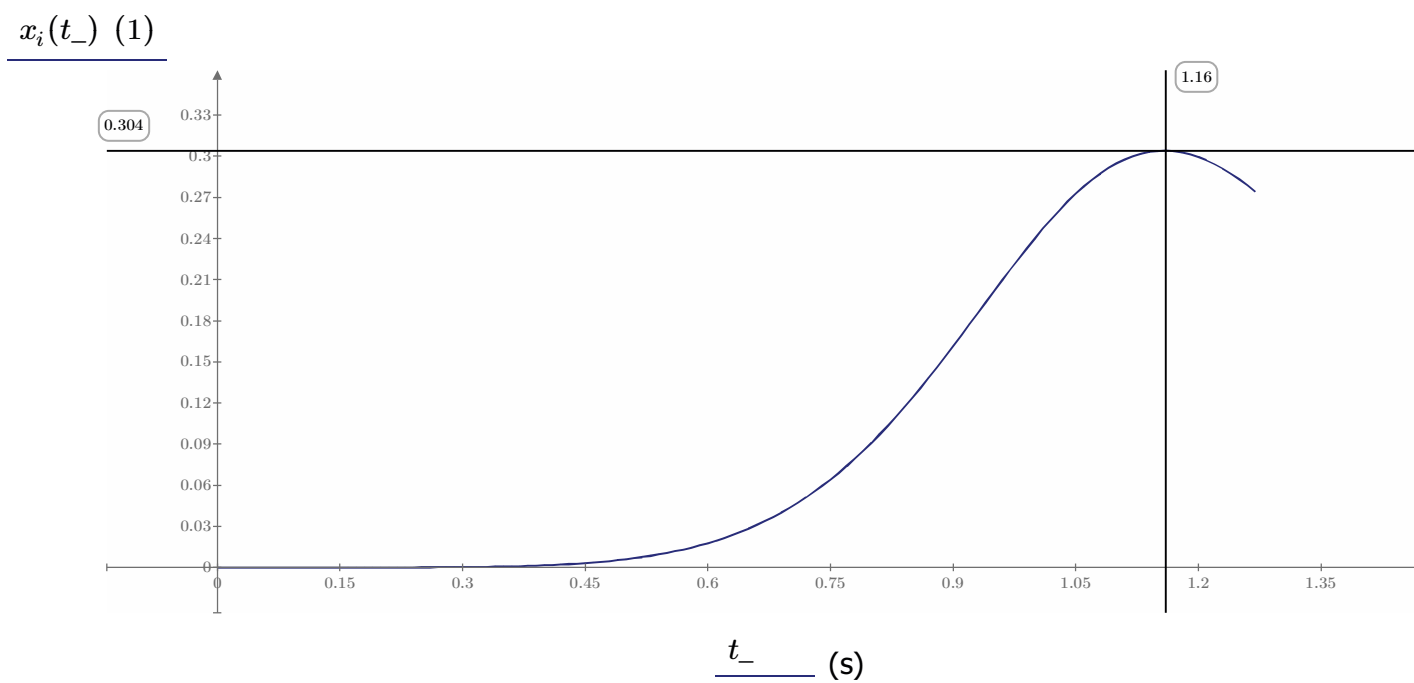
Odporová síla otevřeného vrchlíku v ustáleném klesání rychlostí  $V_s$  [N]

$$F_s := \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V_s^2 \cdot C_D S_0 = 26.061$$

Maximální otevírací síla [N]

$$F_{max} := x_{imax} \cdot F_s = 7.925$$

$$t_- := 0,001 \dots t_0 + 0.1$$

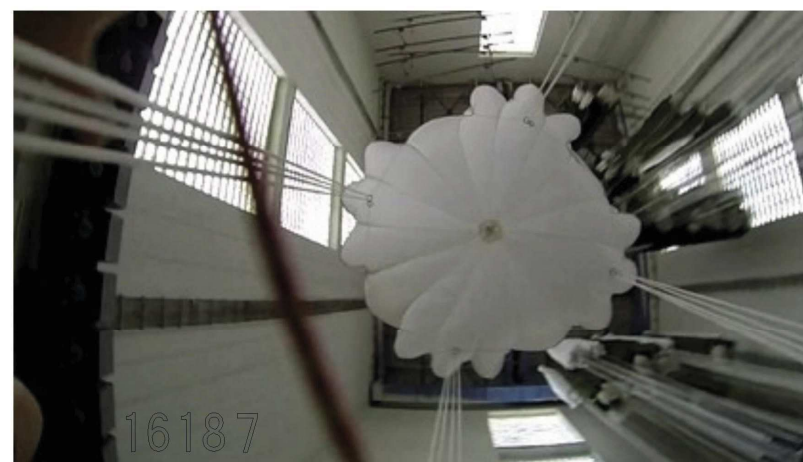


Graf. 1 Průběh součinitele dynamického rázu

## Čas otevření padáku vodorovný směr ( $\eta \neq 0$ )

Součinitel velikosti vstupního hrdla [1]

$$\eta := \frac{1087}{16187} = 0.067$$



Obr. 2 Velikosti ploch pro určení součinitele velikosti vstupního hrdla z videozáznamu

Rovnice: 
$$\Theta_{g_o} = - \left( M_\eta \cdot t_{0\eta} \cdot V_s \cdot \left( A_{M0_o} - \frac{\sqrt{2} \cdot k \cdot A_{S0} \cdot \sqrt{\rho \cdot c_p}}{2} \right) \cdot \left( \ln \left( \frac{M_\eta \cdot t_{0\eta}^7}{2 \cdot \eta^2 - 4 \cdot \eta + 2} \right) - \ln \left( \frac{t_{0\eta}^7}{28 \cdot \eta^2 - 56 \cdot \eta + 28} \cdot (9 \cdot \eta^2 + 3 \cdot \eta + 14 \cdot M_\eta + 2) \right) \right) \right)$$

Kde: 
$$M_\eta = \frac{2 \cdot W}{\rho \cdot g \cdot V_s \cdot t_{0\eta} \cdot C_D S_0}$$

Dosazením M a numerickým řešením:

$$\Theta_{g_o} = - \left[ \frac{2 \cdot W}{\rho \cdot g \cdot V_s \cdot t_{0\eta} \cdot C_D S_0} \cdot t_{0\eta} \cdot V_s \cdot \left( A_{M0_o} - \frac{\sqrt{2} \cdot k \cdot A_{S0} \cdot \sqrt{\rho \cdot c_p}}{2} \right) \cdot \left( \ln \left( \frac{\frac{2 \cdot W}{\rho \cdot g \cdot V_s \cdot t_{0\eta} \cdot C_D S_0} \cdot t_{0\eta}^7}{2 \cdot n^2 - 4 \cdot n + 2} \right) - \ln \left( \frac{t_{0\eta}^7}{28 \cdot n^2 - 56 \cdot n + 28} \cdot \left( 9 \cdot n^2 + 3 \cdot n + 14 \cdot \frac{2 \cdot W}{\rho \cdot g \cdot V_s \cdot t_{0\eta} \cdot C_D S_0} + 2 \right) \right) \right] \right] \xrightarrow{\text{solve}, t_{0\eta}, \text{float}, 3} 1.05$$

Čas otevření padáku vodorovný směr pro ( $\eta = 0.067$ ) [*s*]  $t_{0\eta} := 1.05$

### Velikost dynamického rázu pro ( $\eta = 0.067$ )

## Balistický hmotnostní poměr [1]

$$M_{\eta}:=\frac{2 \cdot W}{\rho \cdot g \cdot V_s \cdot t_{0m} \cdot C_D S_0}=0.196$$

Okamžitý součinitel dynamického rázu [1]

$$x_{i\eta}(t) := \frac{196 \cdot M_{\eta}^2 \cdot t_{0\eta}^{14} \cdot \left( \eta - \frac{t^3 \cdot (\eta - 1)}{t_{0\eta}^3} \right)^2}{\left( 2 \cdot t^7 \cdot \eta^2 - 4 \cdot t^7 \cdot \eta + 2 \cdot t^7 - 7 \cdot t^4 \cdot \eta^2 \cdot t_{0\eta}^3 + 7 \cdot t^4 \cdot \eta \cdot t_{0\eta}^3 + 14 \cdot t \cdot \eta^2 \cdot t_{0\eta}^6 + 14 \cdot M_{\eta} \cdot t_{0\eta}^7 \right)^2}$$

První derivace rovna nule určí lokální maximum:

$$\frac{d}{dt}x_{in}(t)=0 \xrightarrow{\text{solve}, t, \text{float}, 3, \text{assume}, t=\text{RealRange}(0.1, 1.5)} 1.05$$

Součinitel dynamického rázu je největší v okamžiku [ s ]

$$t_{x_{max}} := 1.05$$

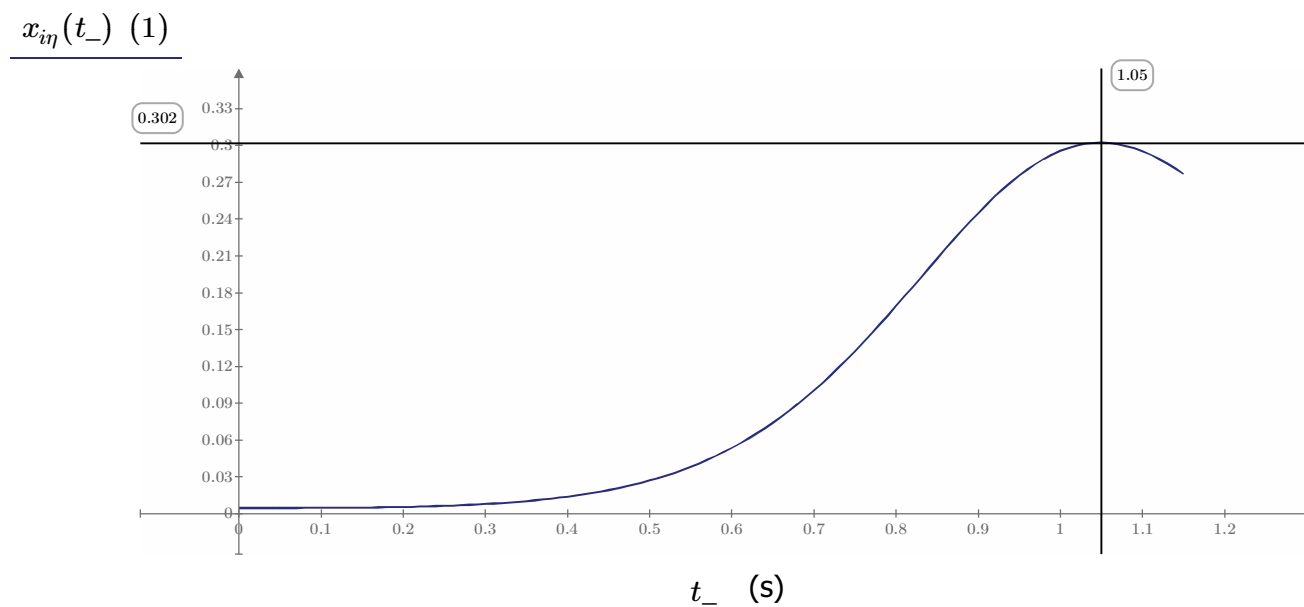
Maximální součinitel dynamického rázu:

$$x_{imax\eta} := \frac{196 \cdot M_{\eta}^2 \cdot t_{0\eta}^{14} \cdot \left( \eta - \frac{t_{x_{imax\eta}}^3 \cdot (\eta - 1)}{t_{0\eta}^3} \right)^2}{\left( 2 \cdot t_{x_{imax\eta}}^7 \cdot \eta^2 - 4 \cdot t_{x_{imax\eta}}^7 \cdot \eta + 2 \cdot t_{x_{imax\eta}}^7 - 7 \cdot t_{x_{imax\eta}}^4 \cdot \eta^2 \cdot t_{0\eta}^3 + 7 \cdot t_{x_{imax\eta}}^4 \cdot \eta \cdot t_{0\eta}^3 + 14 \cdot t_{x_{imax\eta}} \cdot \eta^2 \cdot t_{0\eta}^6 + 14 \cdot M_{\eta} \cdot t_{0\eta}^7 \right)^2} = 0.302$$

Maximální otevírací síla [N]

$$F_{max\eta} := x_{imax\eta} \cdot F_s = 7.878$$

$$t_- := 0,001 \cdot t_{0\eta} + 0.1$$



Graf. 2 Průběh součinitele dynamického rázu



# Čas otevření padáku vodorovný směr ( $n_p = 0.63246$ , $\eta = 0.067$ )

Výpočet pomocí porovnání objemů vzduchu - nalezení  $t_{0\eta m}$  při kterém platí  $\Theta_{g_o} = \Theta_c$

$$\begin{aligned}
 t_{0\eta m} := & \begin{cases} \eta \leftarrow 0.067 \\ k \leftarrow 0.0644 \\ n_p \leftarrow 0.63246 \\ \rho \leftarrow 1.121 \\ c_p \leftarrow 1.7 \\ \Theta_{g_o} \leftarrow 0.378 \\ V_s \leftarrow 5.352 \\ C_{DS_0} \leftarrow 1.623 \\ W \leftarrow 9.81 \\ g \leftarrow 9.81 \\ A_{S_0} \leftarrow 2.164 \\ A_{M_{0_o}} \leftarrow 0.713 \\ t_{0\eta m} \leftarrow 0.001 \\ plusm \leftarrow 0.001 \end{cases} \\
 & \text{while } (\Theta_c < (\Theta_{g_o} - plusm) \vee \Theta_c > (\Theta_{g_o} + plusm)) \\
 & \quad \begin{cases} M_{\eta m} \leftarrow \frac{2 \cdot W}{\rho \cdot g \cdot V_s \cdot t_{0\eta m} \cdot C_{DS_0}} \\ \Theta_c \leftarrow A_{M_{0_o}} \cdot \int_0^{t_{0\eta m}} \left( \frac{1}{t \cdot \eta^2 + \frac{t^7 \cdot (\eta - 1)^2}{7 \cdot t_{0\eta m}^6} - \frac{t^4 \cdot \eta \cdot (\eta - 1)}{2 \cdot t_{0\eta m}^3}} \right) \cdot \left( (1 - \eta) \cdot \left( \frac{t}{t_{0\eta m}} \right)^3 + \eta \right)^2 dt - A_{S_0} \cdot k \cdot \left( \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot c_p \right)^{n_p} \cdot \int_0^{t_{0\eta m}} \left( \frac{1}{t \cdot \eta^2 + \frac{t^7 \cdot (\eta - 1)^2}{7 \cdot t_{0\eta m}^6} - \frac{t^4 \cdot \eta \cdot (\eta - 1)}{2 \cdot t_{0\eta m}^3}} \right)^{2 \cdot n_p} \cdot \left( (1 - \eta) \cdot \left( \frac{t}{t_{0\eta m}} \right)^3 + \eta \right)^2 dt \\ \text{if } (\Theta_c > (\Theta_{g_o} - plusm) \wedge \Theta_c < (\Theta_{g_o} + plusm)) \\ \quad \text{return } t_{0\eta m} \\ \text{else} \\ \quad t_{0\eta m} \leftarrow t_{0\eta m} \cdot \frac{\Theta_{g_o}}{\Theta_c} \end{cases}
 \end{aligned}$$

= 1.202

Čas otevření padáku vodorovný směr pro ( $n_p = 0.63246$ ,  $\eta = 0.067$ ) [s]

$t_{0\eta m} := 1.202$

**Čas otevření padáku obecná trajektorie ( $n_p = 0.63246$ ,  $\eta = 0.067$ )**

Výpočet pomocí porovnání objemů vzduchu - nalezení  $t_{0mg}$  při kterém platí  $\theta_{g-o} = \theta_c$  s přesností *plusm*

$t_{0\eta mg} :=$	$\varphi_0 \leftarrow 90^\circ$	= 0.659
	$\eta \leftarrow 0.067$	
	$k \leftarrow 0.0644$	
	$n_p \leftarrow 0.63246$	
	$\rho \leftarrow 1.121$	
	$c_p \leftarrow 1.7$	
	$\Theta_{g_o} \leftarrow 0.378$	
	$t_{0\eta mg} \leftarrow 0.001$	
	$V_s \leftarrow 5.352$	
	$C_D S_0 \leftarrow 1.623$	
	$W \leftarrow 9.81$	
	$g \leftarrow 9.81$	
	$A_{S0} \leftarrow 2.164$	
	$A_{M0\_o} \leftarrow 0.713$	
	$V \leftarrow V_s$	
	$t \leftarrow 0$	
	$dt \leftarrow 0.01$	
	$plusm \leftarrow 0.001$	
	while $(\langle \Theta_c < (\Theta_{g_o} - plusm) \vee \Theta_c > (\Theta_{g_o} + plusm) \rangle)$	
	$t \leftarrow 0$	
	$\Theta_c \leftarrow 0$	
	$V \leftarrow V_s$	
	$\varphi \leftarrow \varphi_0$	

while  $t \leq t_{0\eta ng}$

$$M_{\eta n} \leftarrow \frac{2 \cdot W}{\rho \cdot g \cdot V_s \cdot t_{0\eta ng} \cdot C_D S_0}$$

$$dV_x \leftarrow \left( - \frac{V^2 \cdot \cos(\varphi) \cdot \left( (1-\eta) \cdot \left( \frac{t}{t_{0\eta ng}} \right)^3 + \eta \right)^2}{M_{\eta n} \cdot V_s \cdot t_{0\eta ng}} \right) \cdot dt$$

$$dV_y \leftarrow \left( g - \frac{V^2 \cdot \sin(\varphi) \cdot \left( (1-\eta) \cdot \left( \frac{t}{t_{0\eta ng}} \right)^3 + \eta \right)^2}{M_{\eta n} \cdot V_s \cdot t_{0\eta ng}} \right) \cdot dt$$

$$d\Theta_c \leftarrow \left( A_{M0_o} \cdot V \cdot \left( (1-\eta) \cdot \left( \frac{t}{t_{0\eta ng}} \right)^3 + \eta \right)^2 - A_{S0} \cdot k \cdot \left( \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot c_p \right)^{n_p} \cdot V^{2 \cdot n_p} \cdot \left( (1-\eta) \cdot \left( \frac{t}{t_{0\eta ng}} \right)^3 + \eta \right)^2 \right) \cdot dt$$

$$V_x \leftarrow V \cdot \cos(\varphi) + dV_x$$

$$V_y \leftarrow V \cdot \sin(\varphi) + dV_y$$

$$V \leftarrow \sqrt{V_x^2 + V_y^2}$$

$$t \leftarrow t + dt$$

$$\Theta_c \leftarrow \Theta_c + d\Theta_c$$

if  $V_x \neq 0$

$$\varphi \leftarrow \operatorname{atan}\left(\frac{V_y}{V_x}\right)$$

if  $(\Theta_c > (\Theta_{g_o} - plusm) \wedge \Theta_c < (\Theta_{g_o} + plusm))$

return  $t_{0\eta ng}$

else

```

|||
|||
||| if  $\Theta_c \neq 0$ 
|||
|||  $t_{0\eta mg} \leftarrow t_{0\eta mg} \cdot \frac{\Theta_{g-o}}{\Theta_c}$ 
|||

```

Čas otevření padáku svislý směr pro ( $n_p = 0.63246$ ,  $\eta = 0.067$ ) [*s*]

$t_{0\eta mg} := 0.659$

	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Tabulka průběhu rychlosti, otevírací síly a vzdálenosti otevření:	“t” “[s]”	“t/t0” “[s]”	“dV” “[m.s-1]”	“V” “[m.s-1]”	“V/VS” “[1]”	“CDS/CDS0” “[1]”	“xi” “[1]”	“F” “[N]”	“ds” “[m]”	“s” “[m]”
	0.00	0.00000	0.00000	5.35	1.00000	0.0044890	0.004489	0.12	0.000000	0.0
	0.01	0.01517	0.09693	5.45	1.01811	0.0044894	0.004654	0.12	0.054513	0.1
	0.02	0.03035	0.09689	5.55	1.03621	0.0044925	0.004824	0.13	0.055483	0.1
	0.03	0.04552	0.09684	5.64	1.05431	0.0045008	0.005003	0.13	0.056452	0.2
	0.04	0.06070	0.09679	5.74	1.07239	0.0045170	0.005195	0.14	0.057421	0.2
	0.05	0.07587	0.09674	5.84	1.09047	0.0045438	0.005403	0.14	0.058390	0.3
	0.06	0.09105	0.09668	5.93	1.10853	0.0045839	0.005633	0.15	0.059358	0.3
	0.07	0.10622	0.09661	6.03	1.12658	0.0046401	0.005889	0.15	0.060325	0.4
	0.08	0.12140	0.09654	6.13	1.14462	0.0047155	0.006178	0.16	0.061292	0.5
	0.09	0.13657	0.09646	6.22	1.16265	0.0048131	0.006506	0.17	0.062258	0.5
	0.10	0.15175	0.09636	6.32	1.18065	0.0049365	0.006881	0.18	0.063224	0.6
	0.11	0.16692	0.09625	6.42	1.19863	0.0050893	0.007312	0.19	0.064189	0.7
	0.12	0.18209	0.09613	6.51	1.21660	0.0052756	0.007808	0.20	0.065153	0.7
	0.13	0.19727	0.09598	6.61	1.23453	0.0055001	0.008382	0.22	0.066115	0.8
	0.14	0.21244	0.09581	6.70	1.25243	0.0057677	0.009047	0.24	0.067077	0.9
	0.15	0.22762	0.09561	6.80	1.27030	0.0060844	0.009818	0.26	0.068037	0.9
	0.16	0.24279	0.09539	6.89	1.28812	0.0064566	0.010713	0.28	0.068996	1.0
	0.17	0.25797	0.09512	6.99	1.30589	0.0068918	0.011753	0.31	0.069952	1.1

PADÁKOVÉ ZÁCHRANNÉ SYSTÉMY  
LEHKÝCH SPORTOVNÍCH LETADEL  
VUT-FSI v Brně, Letecký ústav

Ing. Oldřich Šorf

0.19	0.28832	0.09445	7.18	1.34125	0.0079853	0.014365	0.37	0.071858	1.2
0.20	0.30349	0.09404	7.27	1.35883	0.0086640	0.015997	0.42	0.072807	1.3
0.21	0.31866	0.09356	7.37	1.37631	0.0094462	0.017893	0.47	0.073753	1.3
0.22	0.33384	0.09299	7.46	1.39368	0.0103456	0.020095	0.52	0.074694	1.4
0.23	0.34901	0.09234	7.55	1.41094	0.0113775	0.022650	0.59	0.075631	1.5
0.24	0.36419	0.09159	7.64	1.42805	0.0125590	0.025612	0.67	0.076562	1.6
0.25	0.37936	0.09071	7.73	1.44500	0.0139095	0.029043	0.76	0.077487	1.7
0.26	0.39454	0.08969	7.82	1.46176	0.0154502	0.033013	0.86	0.078405	1.7
0.27	0.40971	0.08852	7.91	1.47830	0.0172050	0.037599	0.98	0.079314	1.8
0.28	0.42489	0.08717	8.00	1.49458	0.0192002	0.042889	1.12	0.080213	1.9
0.29	0.44006	0.08561	8.08	1.51058	0.0214651	0.048980	1.28	0.081101	2.0
0.30	0.45524	0.08381	8.17	1.52624	0.0240317	0.055979	1.46	0.081975	2.1
0.31	0.47041	0.08175	8.25	1.54151	0.0269355	0.064006	1.67	0.082835	2.1
0.32	0.48558	0.07939	8.33	1.55635	0.0302153	0.073188	1.91	0.083677	2.2
0.33	0.50076	0.07670	8.41	1.57068	0.0339137	0.083666	2.18	0.084499	2.3
0.34	0.51593	0.07362	8.48	1.58443	0.0380770	0.095590	2.49	0.085298	2.4
0.35	0.53111	0.07013	8.55	1.59754	0.0427559	0.109118	2.84	0.086070	2.5
0.36	0.54628	0.06618	8.62	1.60990	0.0480054	0.124420	3.24	0.086813	2.6
0.37	0.56146	0.06171	8.68	1.62143	0.0538851	0.141667	3.69	0.087521	2.6
0.38	0.57663	0.05668	8.73	1.63202	0.0604599	0.161035	4.20	0.088190	2.7
0.39	0.59181	0.05105	8.79	1.64156	0.0677995	0.182701	4.76	0.088816	2.8
0.40	0.60698	0.04475	8.83	1.64992	0.0759795	0.206835	5.39	0.089392	2.9
0.41	0.62215	0.03775	8.87	1.65698	0.0850810	0.233597	6.09	0.089913	3.0

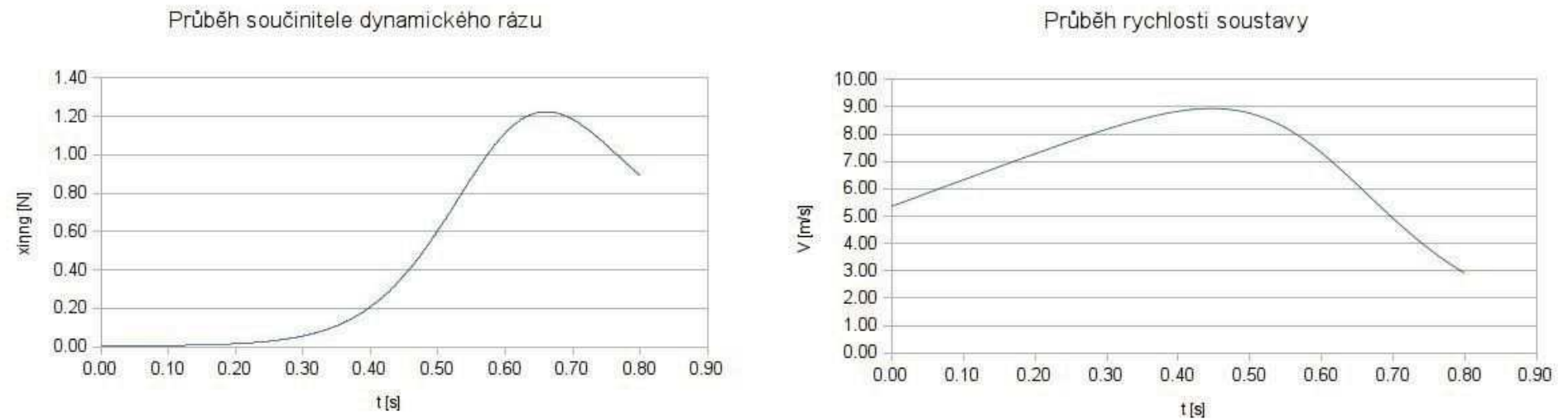
0.42	0.63733	0.03000	8.90	1.66258	0.0951915	0.263127	6.86	0.090372	3.1
0.43	0.65250	0.02147	8.92	1.66660	0.1064048	0.295544	7.70	0.090761	3.2
0.44	0.66768	0.01211	8.93	1.66886	0.1188214	0.330928	8.62	0.091075	3.3
0.45	0.68285	0.00191	8.93	1.66922	0.1325490	0.369319	9.62	0.091303	3.4
0.46	0.69803	-0.00913	8.92	1.66751	0.1477027	0.410701	10.70	0.091439	3.5
0.47	0.71320	-0.02101	8.90	1.66359	0.1644052	0.454994	11.86	0.091474	3.6
0.48	0.72838	-0.03370	8.87	1.65729	0.1827874	0.502044	13.08	0.091399	3.6
0.49	0.74355	-0.04717	8.82	1.64847	0.2029887	0.551615	14.38	0.091206	3.7
0.50	0.75873	-0.06132	8.76	1.63702	0.2251572	0.603382	15.72	0.090886	3.8
0.51	0.77390	-0.07607	8.69	1.62280	0.2494503	0.656925	17.12	0.090432	3.9
0.52	0.78907	-0.09130	8.59	1.60574	0.2760350	0.711732	18.55	0.089837	4.0
0.53	0.80425	-0.10686	8.49	1.58578	0.3050880	0.767201	19.99	0.089094	4.1
0.54	0.81942	-0.12257	8.36	1.56287	0.3367967	0.822652	21.44	0.088198	4.2
0.55	0.83460	-0.13824	8.23	1.53705	0.3713589	0.877339	22.86	0.087147	4.3
0.56	0.84977	-0.15365	8.07	1.50834	0.4089838	0.930470	24.25	0.085937	4.4
0.57	0.86495	-0.16858	7.90	1.47684	0.4498922	0.981236	25.57	0.084570	4.4
0.58	0.88012	-0.18281	7.72	1.44268	0.4943166	1.028833	26.81	0.083047	4.5
0.59	0.89530	-0.19610	7.53	1.40604	0.5425023	1.072499	27.95	0.081374	4.6
0.60	0.91047	-0.20823	7.32	1.36713	0.5947073	1.111539	28.97	0.079556	4.7
0.61	0.92564	-0.21903	7.10	1.32621	0.6512028	1.145355	29.85	0.077605	4.8
0.62	0.94082	-0.22831	6.87	1.28355	0.7122739	1.173471	30.58	0.075531	4.8
0.63	0.95599	-0.23596	6.63	1.23946	0.7782201	1.195553	31.16	0.073347	4.9
0.64	0.97117	-0.24188	6.39	1.19427	0.8493554	1.211415	31.57	0.071069	5.0

0.65	0.98634	-0.24602	6.15	1.14830	0.9260089	1.221028	31.82	0.068714	5.1
0.66	1.00152	-0.24839	5.90	1.10189	1.0085257	1.224511	31.91	0.066298	5.1
0.67	1.01669	-0.24902	5.65	1.05536	1.0972667	1.222120	31.85	0.063840	5.2
0.68	1.03187	-0.24799	5.40	1.00902	1.1926097	1.214230	31.64	0.061357	5.2
0.69	1.04704	-0.24542	5.15	0.96317	1.2949497	1.201316	31.31	0.058868	5.3
0.70	1.06222	-0.24143	4.91	0.91806	1.4046992	1.183922	30.85	0.056389	5.4
0.71	1.07739	-0.23620	4.68	0.87393	1.5222891	1.162641	30.30	0.053935	5.4
0.72	1.09256	-0.22988	4.45	0.83097	1.6481690	1.138089	29.66	0.051522	5.5
0.73	1.10774	-0.22265	4.22	0.78937	1.7828076	1.110880	28.95	0.049161	5.5
0.74	1.12291	-0.21470	4.01	0.74926	1.9266938	1.081614	28.19	0.046863	5.6
0.75	1.13809	-0.20619	3.80	0.71073	2.0803366	1.050854	27.39	0.044639	5.6
0.76	1.15326	-0.19728	3.61	0.67387	2.2442660	1.019120	26.56	0.042494	5.6
0.77	1.16844	-0.18811	3.42	0.63872	2.4190337	0.986881	25.72	0.040435	5.7
0.78	1.18361	-0.17882	3.24	0.60531	2.6052133	0.954547	24.88	0.038465	5.7
0.79	1.19879	-0.16953	3.07	0.57363	2.8034011	0.922472	24.04	0.036588	5.8
0.80	1.21396	-0.16033	2.91	0.54368	3.0142167	0.890955	23.22	0.034804	5.8

Maximální otevírací síla [ $N$ ]  $F_{max\eta\eta g} := 31.91$

Vzdálenost otevření [ $m$ ]  $s := 5.1$





Obr. 3 Grafy průběhů součinitele dynamického rázu a rychlosti soustavy

## ZÁVĚR VÝPOČTU:

Výpočet času otevření a průběhu dynamického rázu zkoušeného modelu padáku pro porovnání se čtvrtou sadou zkoušek (dt\_04\_slud\_pd\_xx), tzn. dělitelný slider se v průběhu otevírání rozdělí.

Vypočítané hodnoty otevíracích časů a maximálního dynamického rázu modelu padáku:

Metoda vodorovný směr:	$t_0 := 1.172 \text{ s}$	$(\eta = 0, n_p = 0.5)$	$F_{max} := 7.925 \text{ N}$
	$t_{0\eta} := 1.05 \text{ s}$	$(\eta = 0.067, n_p = 0.5)$	$F_{max\eta} := 7.878 \text{ N}$
	$t_{0\eta m} := 1.202 \text{ s}$	$(\eta = 0.067, n_p = 0.63246)$	nebyla počítána
Metoda obecné trajektorie:	$t_{0\eta m g} := 0.659 \text{ s}$	$(\eta = 0.067, n_p = 0.63246)$	$F_{max\eta m g} := 31.91 \text{ N}$

Průměrná naměřená hodnota času otevření modelu při shozových zkouškách dt\_04\_slud\_pd\_xx:

$$t_{0drop} := 0.75 \text{ s} \quad \text{se směrodatnou odchylkou } 0.07 \text{ s}$$

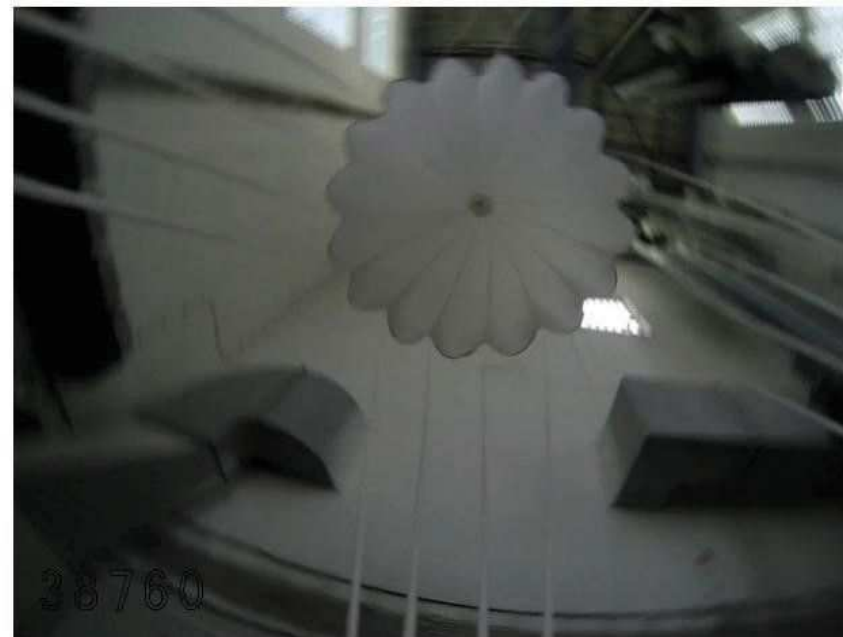
Výpočet se zjednodušením do vodorovného směru je v tomto případě nepoužitelný kvůli nízké rychlosti v okamžiku počátku plnění vrchlíku  $V_s$ . Díky tomu je zde výrazný vliv tíhové síly (soustava z počátku zrychluje), se kterou musí být počítáno.

Vypočítaný čas metodou obecné trajektorie  $t_{0\eta m g} := 0.659 \text{ s}$  je o  $0.091 \text{ s}$  kratší, než průměrný naměřený čas při shozových zkouškách  $t_{0drop} := 0.75 \text{ s}$ . Naměřený čas otevření prodlužuje síla nutná k rozdělení slideru při otevírání padáku, která ve výpočtu není zahrnuta.

## Výpočet času otevření u sady zkoušek dt\_02\_sldn\_np\_xx

tzn. vrchlík bez slideru volně zavěšený s nataženými šňůrami i tkaninou vrchlíku

Vstupní veličiny jsou stejné, jako v předchozím případě. Mění se pouze rychlost v okamžiku počátku plnění vrchlíku vzduchem  $V_s$ , která je rovna 0, resp. kvůli výpočtu je velice malá ( $V_s = 0.001 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ) a geometrické charakteristiky vrchlíku, které jsou neopravené o vliv kovových průchodek slideru.



Obr. 3 Velikosti ploch pro určení součinitele velikosti vstupního hrdla z videozáznamu

$$\eta := \frac{2467}{38760} = 0.064$$

Výpočet pomocí porovnání objemů vzduchu - nalezení  $t_{0\eta mg}$  při kterém platí  $\Theta_g = \Theta_c$  s přesností  $plusm$

$t_{0\eta mg} :=$	$\varphi_0 \leftarrow 90^\circ$ $\eta \leftarrow 0.064$ $k \leftarrow 0.0644$ $n_p \leftarrow 0.63246$ $\rho \leftarrow 1.121$ $c_p \leftarrow 1.7$ $\Theta_g \leftarrow 0.509$ $t_{0\eta mg} \leftarrow 0.001$ $V_s \leftarrow 0.001$ $C_D S_0 \leftarrow 1.623$ $W \leftarrow 9.81$ $g \leftarrow 9.81$ $A_{S0} \leftarrow 2.164$ $A_{M0} \leftarrow 0.87$ $V \leftarrow V_s$ $t \leftarrow 0$ $dt \leftarrow 0.01$ $plusm \leftarrow 0.001$ while $(\Theta_c < (\Theta_g - plusm) \vee \Theta_c > (\Theta_g + plusm))$ $t \leftarrow 0$ $\Theta_c \leftarrow 0$ $V \leftarrow V_s$ $\varphi \leftarrow \varphi_0$ while $t \leq t_{0\eta mg}$ $M_m \leftarrow \frac{2 \cdot W}{\dots}$	$= 0.884$
-------------------	---	-----------

$$\begin{aligned}
 dV_x &\leftarrow \left( -\frac{V^2 \cdot \cos(\varphi) \cdot \left( (1-\eta) \cdot \left( \frac{t}{t_{0\eta mg}} \right)^3 + \eta \right)^2}{M_{\eta n} \cdot V_s \cdot t_{0\eta mg}} \right) \cdot dt \\
 dV_y &\leftarrow \left( g - \frac{V^2 \cdot \sin(\varphi) \cdot \left( (1-\eta) \cdot \left( \frac{t}{t_{0\eta mg}} \right)^3 + \eta \right)^2}{M_{\eta n} \cdot V_s \cdot t_{0\eta mg}} \right) \cdot dt \\
 d\Theta_c &\leftarrow \left( A_{M0} \cdot V \cdot \left( (1-\eta) \cdot \left( \frac{t}{t_{0\eta mg}} \right)^3 + \eta \right)^2 - A_{S0} \cdot k \cdot \left( \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot c_p \right)^{n_p} \cdot V^{2 \cdot n_p} \cdot \left( (1-\eta) \cdot \left( \frac{t}{t_{0\eta mg}} \right)^3 + \eta \right)^2 \right) \cdot dt \\
 V_x &\leftarrow V \cdot \cos(\varphi) + dV_x \\
 V_y &\leftarrow V \cdot \sin(\varphi) + dV_y \\
 V &\leftarrow \sqrt{V_x^2 + V_y^2} \\
 t &\leftarrow t + dt \\
 \Theta_c &\leftarrow \Theta_c + d\Theta_c \\
 \text{if } V_x \neq 0 & \\
 \quad \varphi &\leftarrow \text{atan}\left(\frac{V_y}{V_x}\right) \\
 \text{if } \langle \Theta_c \rangle < \langle \Theta_g - plusm \rangle \wedge \Theta_c < \langle \Theta_g + plusm \rangle & \\
 \quad \text{return } t_{0\eta mg} & \\
 \text{else} & \\
 \quad \text{if } \Theta_c \neq 0 & \\
 \quad \quad t_{0\eta mg} &\leftarrow t_{0\eta mg} \cdot \frac{\Theta_g}{\Theta_c}
 \end{aligned}$$

## ZÁVĚR VÝPOČTU -výpočet času otevření u sady zkoušek dt\_02\_sldn\_np\_xx

tzn. vrchlík bez slideru volně zavěšený s nataženými šňůrami i tkaninou vrchlíku

Čas otevření padáku metoda obecné trajektorie - svislý směr ( $n_p = 0.63246$ ,  $\eta = 0.064$ ) [ $s$ ]  $t_{0\eta ng} := 0.884$

Průměrná naměřená hodnota času otevření modelu při shozových zkouškách dt\_02\_sldn\_np\_xx:

$t_{0drop} := 0.82 \text{ s}$  se směrodatnou odchylkou  $0.02 \text{ s}$

Vypočítaný čas metodou obecné trajektorie  $t_{0\eta ng} := 0.884 \text{ s}$  je o  $0.064 \text{ s}$  delší, než průměrný naměřený čas při shozových zkouškách  $t_{0drop} := 0.82 \text{ s}$ .